

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## MĚŘENÍ BIMETALU U SPÍNACÍHO PŘÍSTROJE

THE MEASUREMENT OF BIMETAL FOR A SWITCHING DEVICE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zbyněk Bartek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Kaser

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Zbyněk Bartek

**ID:** 203545

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření bimetalu u spínacího přístroje

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte podrobnou rešerši na bimetal a normativní požadavky přístrojů, kde se využívá.
2. Změřte potřebné hodnoty zvolených bimetalů na měřicích přístrojích.
3. Zpracujte grafické závislosti z naměřených výsledků.
4. Porovnejte vlastnosti bimetalů ze získaných výsledků.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ČSN EN 60898-1: Elektrická příslušenství – Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalací – Část 1: Jističe pro střídavý provoz (AC)
- [2] ČSN EN 60947-2: Spínací a řídicí přístroje nn – Část 2: Jističe
- [3] Kanthal Thermostatic Bimetal Handbook. In: KANTHAL [online]. Hallstahammar (Sweden): Kanthal - a Sandvik brand, 2008 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: [https://www.ibt.co.il/uploaded\\_files/documents/Kanthal\\_Thermostatic\\_Bimetal\\_U3743.pdf](https://www.ibt.co.il/uploaded_files/documents/Kanthal_Thermostatic_Bimetal_U3743.pdf)
- [4] Valenta, J. Popudové články spínacích přístrojů založené na bimetalech. Brno: FEKT, 2016.

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 27.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Jakub Kaser

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá tepelnou spouští jistících zařízení založenou na bimetalech. V teoretické části je popsán princip funkce bimetalu, materiály a výroba bimetalu, a důležité parametry bimetalu včetně matematického popisu. Dále jsou zmíněny výhody a nevýhody konkrétních bimetalů, druhy bimetalů a jejich použití v praxi, a také jsou popsány normy, které se zabývají jističi. V poslední teoretické části práce jsou uvedeny základní výpočty pro návrh bimetalu. V praktické části se změřil volný průhyb bimetalů, získané výsledky se zpracovaly do grafických závislostí a porovnal se s teoretickými hodnotami.

## **Klíčová slova**

Bimetal; Teplotní roztažnost; Jistič; Měření; Průhyb; Měrný tepelný ohyb

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the thermal trigger of bimetallic-based safety devices. The theoretical part describes the principle of the function of bimetal, materials and production of bimetal, and important parameters of bimetal including mathematical description. Furthermore the advantages and disadvantages of specific bimetals, types of bimetals and their practical use, and standards dealing with circuit breakers are also described. The last theoretical part of the work describes basic calculations for the design of bimetal. In the practical part were measured the free deflection of the bimetals, the results obtained were processed into graphic dependencies and compared with theoretical values.

## **Keywords**

Thermostatic Bimetal; Thermal expansion; Circuit breaker; Measurement; Deflection; Specific deflection

BARTEK, Zbyněk. *Měření bimetalu u spínacího přístroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2021, 62 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jakub Kaser

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Zbyněk Bartek  
**VUT ID autora:** 203545  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2020/21  
**Téma závěrečné práce:** Měření bimetalu u spínacího přístroje

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....  
podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubovi Kaserovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

Podpis autora .....

# Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Seznam symbolů a zkratk	11
Úvod	13
<b>1 Bimetal</b>	<b>14</b>
1.1 Princip fungování bimetalu . . . . .	14
1.2 Materiály bimetalu . . . . .	15
1.3 Výroba bimetalu . . . . .	16
1.4 Parametry bimetalu . . . . .	16
1.4.1 Měrná tepelná křivost . . . . .	16
1.4.2 Měrný tepelný ohyb . . . . .	18
1.4.3 Rozmezí linearity . . . . .	19
<b>2 Druhy bimetalů</b>	<b>20</b>
2.1 Porovnání bimetalu Kanthal 155 a Kanthal 60 . . . . .	21
2.2 Porovnání bimetalu Kanthal 145 a Kanthal 145R10 . . . . .	22
<b>3 Použití bimetalu</b>	<b>24</b>
3.1 Bimetalový teploměr . . . . .	24
3.2 Bimetalový termostat . . . . .	24
3.3 Spínací přístroje . . . . .	24
<b>4 Požadavky norem na jističe</b>	<b>25</b>
4.1 Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalacích . .	25
4.1.1 Standardní podmínky pro funkci v provozu . . . . .	25
4.1.2 Požadavky na konstrukci a činnost jističe . . . . .	26
4.1.3 Smluvené veličiny . . . . .	28
4.2 Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Jističe . . . . .	29
4.2.1 Základní parametry jističe . . . . .	29
4.3 Zkoušky jističů . . . . .	31
4.3.1 Zkušební sled 1: Obecné provozní vlastnosti . . . . .	31
4.3.2 Zkušební sled 2: Jmenovitá provozní zkratová vypínací schopnost	33
4.3.3 Zkušební sled 3: Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost	33



<b>5</b>	<b>Výpočet bimetalu</b>	<b>35</b>
5.1	Jednostranně upevněný bimetal obdélníkového tvaru . . . . .	35
5.2	Jednostranně upevněný bimetal zkoseného tvaru . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Měření bimetalů</b>	<b>38</b>
6.1	Měření volného průhybu bimetalu . . . . .	38
6.1.1	Postup měření u jističe Siemens 160A . . . . .	38
6.1.2	Postup měření u domovních jističů EATON 10A a OEZ 2A . .	40
6.1.3	Použité měřicí přístroje . . . . .	42
6.2	Změřené závislosti . . . . .	43
6.2.1	Jistič Siemens . . . . .	43
6.2.2	Jistič EATON FAZ-C10/1 . . . . .	45
6.2.3	Jistič OEZ LSN-2B-1 . . . . .	47
6.3	Chyby měření . . . . .	49
<b>7</b>	<b>Porovnání měřených bimetalů</b>	<b>50</b>
	<b>Závěr</b>	<b>56</b>
	<b>Literatura</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>59</b>
<b>A</b>	<b>Naměřené hodnoty volného průhybu bimetalu kompaktního jističe Siemens 160A</b>	<b>60</b>
<b>B</b>	<b>Naměřené hodnoty volného průhybu bimetalu domovního jističe EATON 10A</b>	<b>61</b>
<b>C</b>	<b>Naměřené hodnoty volného průhybu bimetalu domovního jističe OEZ 2A</b>	<b>62</b>

# Seznam obrázků

1.1	Princip funkce bimetalu (převzato z [1]) . . . . .	14
1.2	Vrstvy bimetalu (převzato z [4]) . . . . .	15
1.3	Měrná tepelná křivost (převzato z [1]) . . . . .	17
1.4	Měrný tepelný ohyb (převzato z [1]) . . . . .	18
1.5	Rozmezí linearity (převzato z [1]) . . . . .	19
5.1	Definice rozměrů jednostranně upevněného bimetalu obdélníkového tvaru (převzato z [1]) . . . . .	36
5.2	Definice rozměrů jednostranně upevněného bimetalu zkoseného tvaru (převzato z [1] a [7]) . . . . .	37
6.1	Zapojení kompaktního jističe Siemens 160A a snímače vzdálenosti . .	39
6.2	Schéma zapojení pro měření kompaktního jističe Siemens 160A . . . .	40
6.3	Zapojení domovního jističe EATON 10A a OEZ 2A a snímače vzdálenosti . . . . .	41
6.4	Schéma zapojení pro měření domovních jističů EATON 10A a OEZ 2A	41
6.5	Graf závislosti volného průhybu bimetalu kompaktního jističe Siemens 160A na průměrném oteplení . . . . .	43
6.6	Graf závislosti teploty částí bimetalu kompaktního jističe Siemens 160A a proudu na čase . . . . .	44
6.7	Graf závislosti volného průhybu bimetalu domovního jističe EATON 10A na průměrném oteplení . . . . .	45
6.8	Graf závislosti teploty částí bimetalu domovního jističe EATON 10A a proudu na čase . . . . .	46
6.9	Graf závislosti volného průhybu bimetalu domovního jističe OEZ 2A na průměrném oteplení . . . . .	47
6.10	Graf závislosti teploty bimetalu domovního jističe OEZ 2A a proudu na čase . . . . .	48
7.1	Porovnání závislostí volného průhybu bimetalu kompaktního jističe Siemens 160A a domovního jističe OEZ 2A na oteplení . . . . .	50
7.2	Graf závislosti vypočítaného a změřeného volného průhybu bimetalu na oteplení pro skutečné rozměry bimetalu v domovním jističi OEZ 2A . . . . .	52
7.3	Graf závislosti vypočítaného a změřeného volného průhybu bimetalu na oteplení pro skutečné rozměry bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A . . . . .	54

# Seznam tabulek

2.1	Měrný elektrický odpor a tepelná vodivost různých bimetalů (převzato z [1]) . . . . .	21
4.1	Hodnoty oteplení (převzato z [5]) . . . . .	26
4.2	Pracovní charakteristiky čas-proud (převzato z [5]) . . . . .	28
4.3	Nejnižší hodnoty jmenovitého krátkodobého výdržného proudu (převzato z [6]) . . . . .	31
4.4	Vypínací charakteristiky závislých časových nadproudových vypínacích spouští při referenční teplotě (převzato z [6]) . . . . .	31
4.5	Charakteristiky obvodu pro zkoušku činnosti při přetížení (převzato z [6]) . . . . .	32
6.1	Seznam přístrojů použitých pro měření volného průběhu bimetalu . .	42
7.1	Výpočet volného průhybu bimetalu pro rozměry bimetalu v domovním jističi O EZ 2A (hodnoty převzaty z [1]) . . . . .	51
7.2	Porovnání měrných tepelných ohybů bimetalů z katalogu a bimetalu v domovním jističi O EZ 2A (hodnoty převzaty z [1]) . . . . .	52
7.3	Výpočet volného průhybu bimetalu pro rozměry bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A (hodnoty převzaty z [1]) . . . . .	53
7.4	Porovnání měrných tepelných ohybů bimetalů z katalogu a bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A (hodnoty převzaty z [1]) . . . . .	54

# Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Veličina	Jednotka
$a$	Měrný tepelný ohyb	$[K^{-1}]$
$A$	Průhyb bimetalu	$[m]$
$A_m$	Měřená hodnota volného průhybu bimetalu	$[mm]$
$A_v$	Vypočítaná hodnota volného průhybu bimetalu	$[mm]$
$b$	Šířka bimetalového pásku	$[m]$
$b_1, b_2$	Šířka zkoseného bimetalu	$[mm]$
$E$	Modul pružnosti	$[Pa]$
$E_1$	Modul pružnosti aktivní vrstvy	$[Pa]$
$E_2$	Modul pružnosti pasivní vrstvy	$[Pa]$
$F$	Síla vyvíjená bimetalem	$[N]$
$F_1, F_2$	Síly vyvolávající ohyb bimetalu	$[N]$
$F_m$	Síla vyvíjená bimetalem při omezeném průhybu	$[N]$
$F_t$	Síla vyvíjená bimetalem při omezeném průhybu a změně teploty	$[N]$
$F_u$	Protisíla mechanismu	$[N]$
$I_{cu}$	Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost	$[A]$
$I_{cs}$	Jmenovitá provozní zkratová vypínací schopnost	$[A]$
$I_{cw}$	Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	$[A]$
$I_n$	Jmenovitý proud	$[A]$
$I_{nt}$	Smluvený nevypínací proud	$[A]$
$I_t$	Smluvený vypínací proud	$[A]$
$I_{th}$	Smluvený tepelný proud bez krytu	$[A]$
$I_{the}$	Smluvený tepelný proud v krytu	$[A]$
$I_u$	Jmenovitý trvalý proud	$[A]$
$k$	Měrná tepelná křivost	$[K^{-1}]$
$L$	Délka bimetalového pásku	$[m]$
$L_1$	Délka aktivní vrstvy	$[m]$
$L_2$	Délka pasivní vrstvy	$[m]$
$\Delta L$	Změna délky bimetalu	$[m]$
$\Delta L_1$	Změna délky aktivní vrstvy	$[m]$
$\Delta L_2$	Změna délky pasivní vrstvy	$[m]$
$n$	součinitel poměru šířky vrstev	$[-]$

$R_T$	Poloměr při teplotě $T$	[m]
$R_0$	Poloměr při teplotě okolí $T_0$	[m]
$s$	Tloušťka bimetalu	[m]
$s_1$	Tloušťka aktivní vrstvy	[m]
$s_2$	Tloušťka pasivní vrstvy	[m]
$T$	Měřená teplota bimetalu	[°C]
$T_0$	Teplota okolí	[°C]
$T_1$	Teplota	[°C]
$\Delta T$	Oteplení	[K]
$T_A$	Oteplení použité na průhyb	[°C]
$T_F$	Oteplení použité na vyvinutí síly	[°C]
$t$	čas	[s]
$U_e$	Jmenovité pracovní napětí	[V]
$U_i$	Jmenovité izolační napětí	[V]
$U_{imp}$	Jmenovité impulzní výdržné napětí	[V]
$V_{min}$	Minimální objem pásku	[mm <sup>3</sup> ]
$\alpha$	Činitel teplotní roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_1$	Činitel teplotní roztažnosti aktivní vrstvy	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_2$	Činitel teplotní roztažnosti pasivní vrstvy	[K <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	Tepelná vodivost	[W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Měrný elektrický odpor	[Ω.mm <sup>2</sup> .m <sup>-1</sup> ]
$\sigma_{max}$	Maximální ohybové napětí	[Pa]
$\varphi$	úhel mezi volným koncem bimetalu a jeho původní polohou	[°]
$\Psi$	Součinitel pro výpočet zkoseného pásku	[-]
<b>Zkratka</b>	<b>Popis</b>	
Cu	Měď	
Cr	Chrom	
ČSN	Česká norma	
EN	Evropská norma	
Fe	Železo	
Ni	Nikl	
Mn	Mangan	
Zn	Zinek	

# Úvod

V současnosti je elektrická energie nezastupitelným zdrojem energie a požadavky na její výrobu a přenos se neustále zvyšují. Důležitá je však i ochrana elektrických zařízení, jelikož poškození zařízení může zapříčinit vážné ekonomické dopady. Nadproud neboli proud, který má větší hodnotu než jmenovitý proud zařízení, má špatný vliv na zařízení, protože při jeho působení vznikají nežádoucí tepelné a silové účinky. Aby nedocházelo k poškození zařízení, byly vytvořeny samočinné mechanické spínací přístroje neboli jističe, které jsou schopné přerušit obvod a chránit tak zařízení.

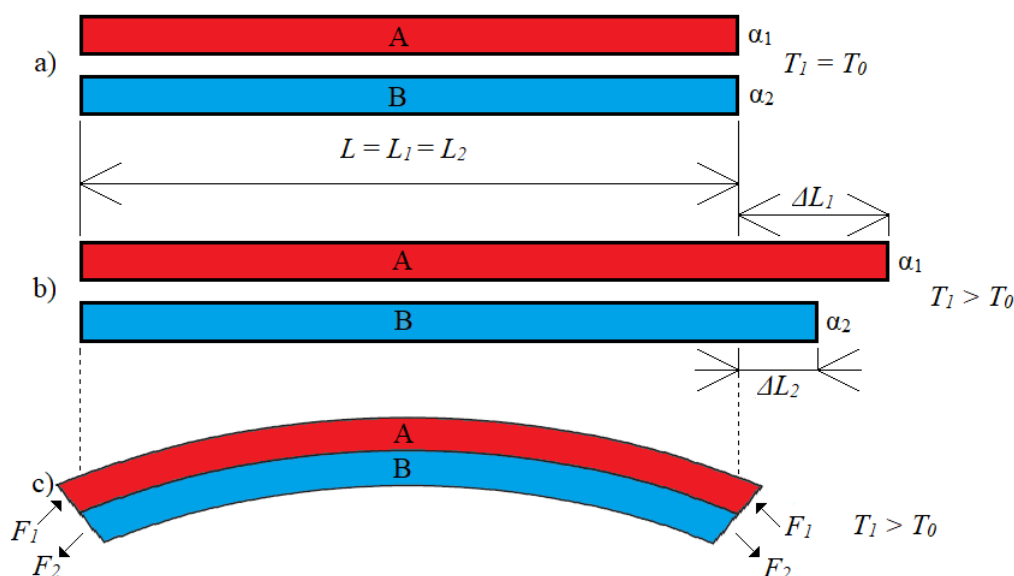
Jistič tedy musí při určité velikosti nadproudu a jeho době trvání přerušit obvod pomocí vlastních silových kontaktů a tím zajistit ochranu elektrických zařízení. Je však nutné, aby jeho funkce tolerovala časově omezené nadproudy, které vznikají při normálním provozu (např. zapínání). Pro snímání a vyhodnocování nadproudů se nejčastěji využívají elektromagnety a bimetaly, které tvoří základní prvky nadproudových spouští. Nadproudové spouště je tedy možné rozdělit na dva typy, zkratová - tvořená elektromagnetem a tepelná - tvořená bimetalem.

Tato bakalářská práce se zabývá tepelnou spouští jisticích zařízení založených na bimetalech. Nejprve je popsán princip funkce bimetalu, dále materiály používané k výrobě, samotná výroba bimetalu a základní parametry bimetalu. Dále se věnuje porovnání různých druhů bimetalu a praktické využití bimetalu. Součástí této práce je i kapitola ohledně normativních požadavků na jistič a jeho bimetalovou část. Na konci teoretické části práce jsou uvedeny základní výpočty pro návrh bimetalu. Práce také obsahuje popis měření volného průhybu bimetalu v jističi, zpracování získaných výsledků z měření do závislosti volného průhybu bimetalu na oteplení a závislosti teploty bimetalu na čase. V poslední části této práce je provedeno porovnání vlastností bimetalů ze získaných výsledků.

# 1 Bimetal

## 1.1 Princip fungování bimetalu

Bimetal se nejčastěji skládá ze dvou nebo více kovových vrstev. Tyto vrstvy bývají ve formě pásků spojených po celé své délce. Každá z těchto vrstev má rozdílnou hodnotu činitele teplotní roztažnosti ( $\alpha_1, \alpha_2$ ), přičemž platí, že  $\alpha_1 > \alpha_2$ . Strana s materiálem, která má větší hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti ( $\alpha_1$ ), se nazývá aktivní a strana s materiálem, který má menší hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti ( $\alpha_2$ ), se nazývá pasivní.



Obr. 1.1: Princip funkce bimetalu (převzato z [1])

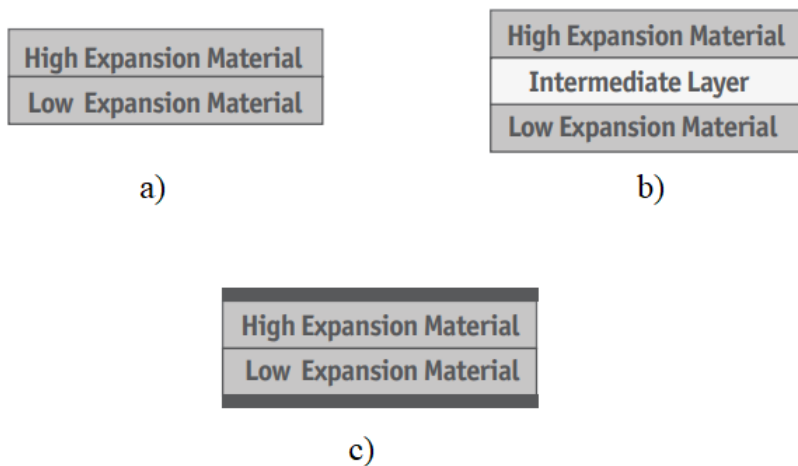
Předpokládá se, že při okolní teplotě  $T_0$ , která se pohybuje okolo  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , má pásek A ( $\alpha_1$ ) a pásek B ( $\alpha_2$ ) stejnou délku, tedy  $L = L_1 = L_2$  (viz. Obr. 1.1a). Pokud se pásky zahřejí na teplotu  $T_1$ , kdy teplota  $T_1 > T_0$ , každý z těchto pásků se prodlouží o jinou délku  $\Delta L$  díky jejich rozdílným hodnotám činitele teplotní roztažnosti  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  (viz. Obr. 1.1b). Pokud se pásky A a B spojí dohromady a zahřejí se na teplotu  $T_1$ , pásek A je namáhán na tlak ( $F_1$ ) díky pásku B a pásek B je namáhán na tah ( $F_2$ ) díky pásku A. Tyto dvě síly vytvoří moment, který způsobí rovnoměrný ohyb obou pásků. Tento ohyb nabývá formy oblouku (viz. Obr. 1.1c). Změna zakřivení nebo ohýbání bimetalového pásku je závislé nejen na rozdílu hodnot dvou koeficientů teplotní roztažnosti  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$ , ale i na modulu pružnosti  $E$ , relativní tloušťce  $s$  a na změně teploty. [1]

## 1.2 Materiály bimetalu

V předchozí kapitole bylo vysvětleno, že pro správné fungování bimetalu je nutné, aby materiály, ze kterých se bimetal skládá, měly dostatečně rozdílný koeficient teplotní roztažnosti. Jednotlivé vrstvy se tedy skládají z různých materiálů.

U aktivního materiálu vzniká požadavek na velkou hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti ( $\alpha_1$ ). Materiál tvoří železná či neželezná slitina. Ze železných slitin se používají slitiny Fe-Ni-Mn nebo Fe-Ni-Cr. Neželezné slitiny často bývají na bázi mědi či niklu s malým zastoupením jiných kovů. Používá se konstantan (Cu-Ni-Mn) nebo mosaz (Cu-Zn). Pasivní prvek je tvořen slitinami, které mají nízkou hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti ( $\alpha_2$ ). Nejčastěji se používá slitina Invar, která se skládá ze železa a niklu (Fe-Ni), kde železo tvoří 64 % a nikl 36 % slitiny.

V praxi se můžeme setkat s bimetalu, které mají i více než dvě vrstvy. Na obrázku 1.2a vidíme bimetal tvořený dvěma vrstvami, přičemž jedna má vysoký činitel teplotní roztažnosti a druhá má nízký součinitel teplotní roztažnosti. Mezi tyto dvě vrstvy se vloží další vrstva (mezivrstva), která se skládá z mědi, niklu nebo z různých slitin (viz. Obr. 1.2b). Díky vložení této mezivrstvy se docílí snížení elektrického odporu a zvýšení tepelné vodivosti, dochází však i ke zhoršení citlivosti bimetalu. Občas se přidávají vrstvy i na okraje bimetalu pro zajištění ochrany proti korozi (viz. Obr. 1.2c). [2]



Obr. 1.2: Vrstvy bimetalu (převzato z [4])



## 1.3 Výroba bimetalu

V dnešní době se používají dva způsoby spojování. Většina průmyslu věnující se výrobě bimetalu využívá proces studeného spojování, který vyžaduje následné použití slinování. Tento proces odstraní z kovu oxidy a další nečistoty, a celkově zlepší spojení vrstev. [3]

Dle [3] firma Shivalik Bimetal Controls LTD využívá proces spojování za tepla, který závisí více na teplotě a méně na tlaku než tradiční metoda studeného spojování. Než dojde ke spojení kovů, materiály prochází redukční atmosférou, která odstraňuje oxidy a další nečistoty. V době spojení kovů dochází ke zmenšení tloušťky materiálu pod tlakem při teplotě, která nabývá hodnoty mezi 70 až 80 procenty jejich teploty tání. Kovové pásy tak získají pevné spojení způsobené sdílením elektronů povrchových atomů těchto vrstev. A proto nevzniká potřeba využití slinování. Po spojení kovů následuje žhánání materiálu a pomocí přesného válcování za studena je materiál vytvarován do finální tloušťky. Díky speciální kyselině se na pásku vyleptá identifikace, která označuje aktivní a pasivní stranu.

## 1.4 Parametry bimetalu

### 1.4.1 Měrná tepelná křivost

Měrná tepelná křivost je nejdůležitější parametr bimetalu. Bimetalový pásek, který má dvě vrstvy, změní své zakřivení při vystavení teplu podle vztahu:

$$\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_0} = \frac{6 \times (\alpha_1 - \alpha_2) \times (1 + m)^2}{3 \times (1 + m)^2 + (1 + m \times n) \times (m^2 + \frac{1}{m \times n})} \times \frac{T_1 - T_0}{s} \quad (1.1)$$

Měrná tepelná křivost je tedy funkcí součinitelů teplotní roztažnosti, modulů pružnosti v tahu a tloušťky obou vrstev bimetalu. Velice často mají vrstvy bimetalu stejnou tloušťku  $s_1 = s_2$ , tedy  $m = 1$ . Stejně to platí i pro modul pružnosti pro obě vrstvy  $E_1 = E_2$ , tedy  $n = 1$ . Dosazením do rovnice (1.1) se vztah změní na:

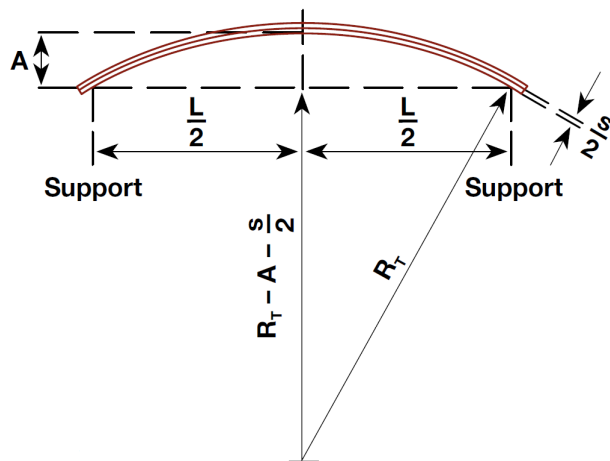
$$\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_0} = \frac{3 \times (\alpha_1 - \alpha_2)}{2} \times \frac{T_1 - T_0}{s} \quad (1.2)$$

Z rovnice (1.2) se získá konstanta  $k = \frac{3 \times (\alpha_1 - \alpha_2)}{2}$ , která se nazývá měrná tepelná křivost, přičemž její jednotka je  $[K^{-1}]$ . Při dosazení konstanty  $k$  do rovnice (1.2) se získá rovnice:

$$k = \frac{(\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_0}) \times s}{T_1 - T_0} \quad (1.3)$$

Jestliže je bimetal při teplotě  $T_0$  rovný, hodnota  $R_0 = \infty$  a rovnice (1.2) se zjednoduší na:

$$\frac{1}{R_T} = k \times \frac{T_1 - T_0}{s} \quad (1.4)$$



Obr. 1.3: Měrná tepelná křivost (převzato z [1])

Rovnice pro výpočet křivosti se může vyjádřit z Obr. 1.3 pomocí Pythagorovy věty:

$$R_T^2 = (R_T - A - \frac{s}{2})^2 + (\frac{L}{2})^2 \quad (1.5)$$

Po matematické úpravě rovnice (1.5) vznikne vztah:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{8 \times A}{L^2 + 4 \times A^2 - 4 \times A \times s} \quad (1.6)$$

Pokud platí předpoklad, že při teplotě  $T_0$  je bimetalový pásek rovný, spojením rovnic (1.4) a (1.6) vznikne rovnice:

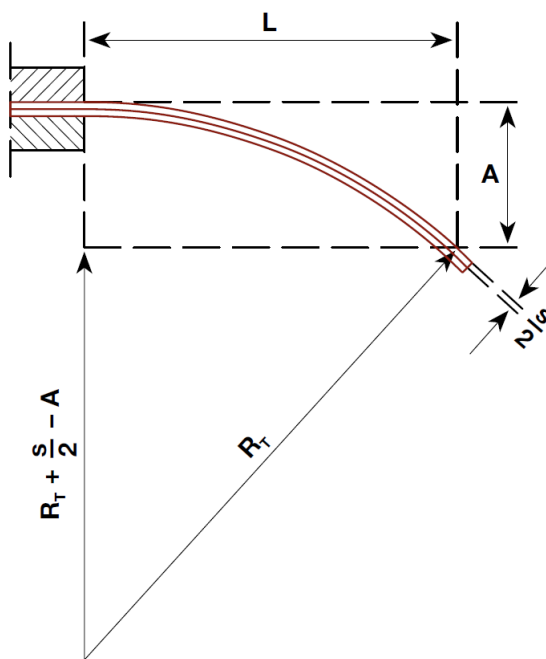
$$k = \frac{s}{T_1 - T_0} \times \frac{8 \times A}{L^2 + 4 \times A^2 - 4 \times A \times s} \quad (1.7)$$

Obvykle se ve jmenovateli zanedbá  $4 \times A \times s$ , a pokud je hodnota  $A$  menší než 5% hodnoty  $L$ , taktéž se může ve jmenovateli zanedbat  $4 \times A^2$ . Rovnice se potom zjednoduší na: [1]

$$k = \frac{8 \times A \times s}{(T_1 - T_0) \times L^2} \quad (1.8)$$

### 1.4.2 Měrný tepelný ohyb

V Evropě je měrný tepelný ohyb definován jako vychýlení rovného bimetalového pásku uchyceného na jednom konci o tloušťce 1 mm a délce 100 mm při změně teploty o 1°C v rozmezí linearity. Tato hodnota je vyšší než hodnota uvedená v tabulce fyzikálních vlastností, konkrétně o čtyři desetinná místa. Značí se  $a$  a její jednotka je  $[\text{K}^{-1}]$ .



Obr. 1.4: Měrný tepelný ohyb (převzato z [1])

Z Obr. 1.4 se pomocí Pythagorovy věty získá rovnice:

$$(R_T + \frac{s}{2})^2 = (R_T + \frac{s}{2} - A)^2 + (L)^2 \quad (1.9)$$

Po matematické úpravě rovnice (1.9) vznikne rovnice:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{2 \times A}{L^2 + A^2 - A \times s} \quad (1.10)$$

Pokud platí předpoklad, že při teplotě  $T_0$  je bimetal rovný a hodnota  $R_0 = \infty$ , sloučením rovnic (1.4), (1.10) a nahrazením veličiny  $k$  rovnicí  $a = \frac{k}{2}$ , vznikne rovnice:

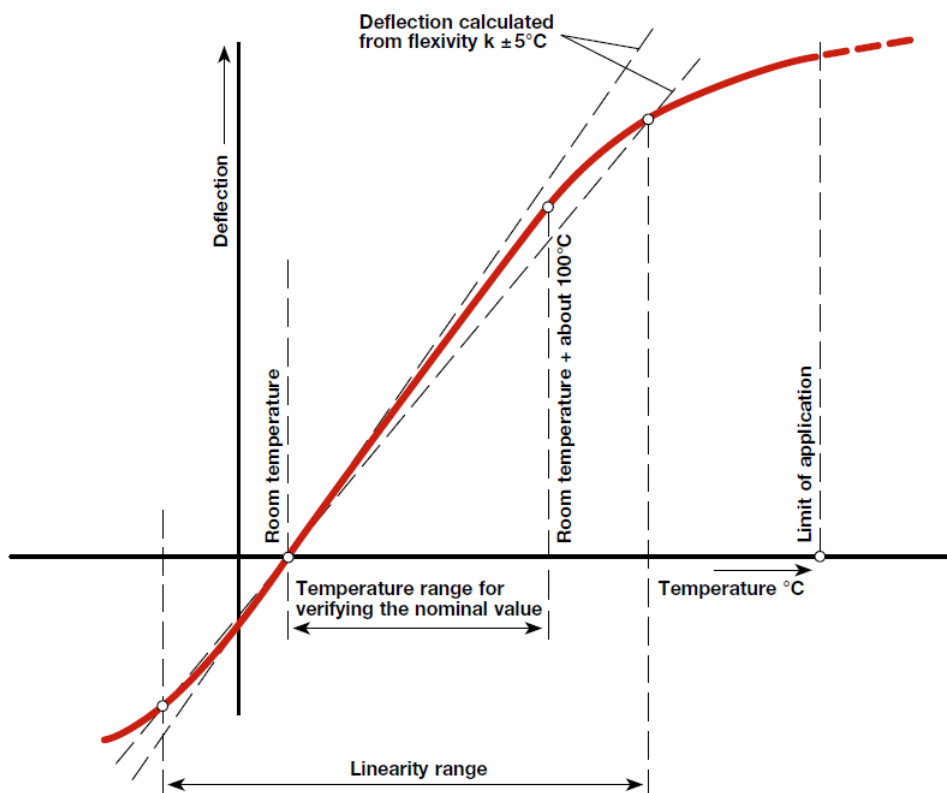
$$a = \frac{A \times s}{(T_1 - T_0) \times (L^2 + A^2 - A \times s)} \quad (1.11)$$

Stejně jako u měrné tepelné křivosti se ve jmenovateli zanedbá  $A \times s$ . Při výpočtech je velmi často hodnota  $A$  menší než 10% hodnoty  $L$ , a proto se ve jmenovateli taktéž zanedbá  $A^2$ . Rovnice (1.11) se zjednoduší na: [1]

$$a = \frac{A \times s}{(T_1 - T_0) \times L^2} \quad (1.12)$$

### 1.4.3 Rozmezí linearity

Rozmezí linearity označuje teplotní rozsah, ve kterém se teplotní ohyb nevychýlí o více než  $\pm 5\%$  od vypočítané hodnoty z jmenovité hodnoty měrné tepelné křivosti určitého bimetalu. Tato hodnota je však pouze pomocná a není nutné omezit využití bimetalu pouze v rozsahu linearity. Jak je zobrazeno v grafu (Viz. Obr. 1.5), bimetal lze použít i mimo rozmezí linearity.[1]



Obr. 1.5: Rozmezí linearity (převzato z [1])

Obr. 1.5 zobrazuje závislost průhybu na teplotě. Na vynesené křivce je zaznačeno rozmezí linearity, maximální provozní teplota a pomocné přímky, které vymezují rozsah linearity.

## 2 Druhy bimetalů

Různorodost používaných bimetalů v praxi je obrovská, jelikož parametry každého bimetalu určuje jeho složení. Parametry bimetalů určuje počet vrstev, zejména však druh materiálu ze kterého je každá vrstva bimetalu vyrobena. Tyto parametry následně určují využití bimetalů v praxi. Při volbě bimetalu pro praktické použití by měly být zváženy tyto faktory:[1]

- **Provozní teplota a průhyb**

Dle [1] je nutné při výběru bimetalu vzít v potaz, že průhyb se mění s teplotou. To znamená, že čím větší je určitý průhyb bimetalu, tím menší je rozsah linearity a nižší nejvyšší možná teplota. V případě, kdy je požadován velký průhyb bimetalu při minimální změně teploty, je vhodné použít bimetalu typu Kanthal 230 nebo Kanthal 200. Tyto konkrétní typy bimetalu nevydrží velký mechanický nápor a neměly by se zahřívat na teplotu vyšší než je jejich teplotní rozsah.

- **Mechanické namáhání**

Bimetal se často nachází ve stavu mechanického namáhání díky působení vnější síly. Je-li bimetal díky mechanickému namáhání přetížený, dochází k permanentní deformaci. Každý typ bimetalu má jiné maximální přípustné ohybové napětí, které je závislé na teplotě, a to samé platí i pro modul pružnosti.[1]

- **Měrný elektrický odpor a tepelná vodivost**

Bimetal, který má vysoký měrný elektrický odpor  $\rho$ , má nízkou tepelnou vodivost  $\lambda$ . To samé platí i naopak, tedy bimetal s vysokou tepelnou vodivostí má nízký měrný elektrický odpor. Vysoká tepelná vodivost způsobuje velice rychlou reakci, je-li bimetal zahříván. Při zahřívání bimetalu pomocí topné cívky se preferuje, aby bimetal měl nízkou tepelnou vodivost, jinak vznikají vysoké ztráty způsobené vodivostí a musela by se použít výkonnější topná spirála. Často se bimetal používá i v elektrických obvodech, a proto by měl mít použitý bimetal nízký měrný elektrický odpor, jelikož jakékoliv ztráty způsobené elektrickým proudem jsou nežádoucí. Ale ve spoustě případů je nutné, aby procházející elektrický proud zahříval bimetal, a jelikož je daný proud fixní, elektrický odpor bimetalu se může vypočítat. Bimetal typu Kanthal 140R140 je vhodný pro přímé zahřívání, zvláště v rozsahu nízkých proudů, kde je potřebný vysoký tepelný ohyb. Bimetal typu Kanthal 135R25 je vhodné použít v elektrických obvodech při přímém zahřívání, jelikož má mezivrstvu z niklu, která snižuje elektrický odpor bimetalu. V tabulce 2.1 je výpis jednotlivých

bimetalů s různými hodnotami měrného elektrického odporu a tepelné vodivosti.[1]

Tab. 2.1: Měrný elektrický odpor a tepelná vodivost různých bimetalů (převzato z [1])

Typ bimetalu	Počet vrstev	Mezivrstva	Měrný elektrický odpor při 20 °C [ $\Omega \times mm^2 \times m^{-1}$ ]	Tepelná vodivost [ $W \times m^{-1} \times ^\circ C^{-1}$ ]
Kanthal 230	2	Žádná	1,05	6
Kanthal 155	2	Žádná	0,78	13
Kanthal 145	2	Žádná	0,79	12
Kanthal 130	2	Žádná	0,74	12
Kanthal 155R55	3	Nikl	0,55	16
Kanthal 145R35	3	Nikl	0,35	22
Kanthal 145R10	3	Měď	0,11	70
Kanthal 130R05	3	Měď	0,06	114

- **Odolnost proti korozi**

Dle [1] má většina bimetalů typu Kanthal výrazně lepší odolnost proti korozi než železo, a díky tomu mohou tyto bimetaly pracovat bez zvláštní ochrany proti korozi. Bimetal typu Kanthal 94s má vysokou odolnost proti korozi, jelikož obě vrstvy obsahují slitiny nerezové oceli s niklem a chromem, a je tedy vhodný pro použití ve vodě nebo páře.

## 2.1 Porovnání bimetalu Kanthal 155 a Kanthal 60

Kanthal 155 je dvouvrstvý bimetal se složením 36Ni/NiMn-steel. Aktivní vrstva je vyrobena z oceli s niklem a manganem, pasivní vrstva je ze slitiny Invar. Výhodou tohoto bimetalu je jeho specifická hodnota měrného tepelného ohybu, která je  $15,6 \times$

$10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , a specifická hodnota měrné tepelné křivosti, která je  $28,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , při teplotním rozsahu od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+350^\circ\text{C}$ , v extrémních případech do  $+450^\circ\text{C}$ . Nevýhodou je jeho rozmezí linearity, které se pohybuje od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+250^\circ\text{C}$ . Další významný parametr je měrný tepelný odpor při  $20^\circ\text{C}$  nabývající hodnoty  $0,78\Omega \times \text{mm}^2 \times \text{m}^{-1}$  a také tepelná vodivost  $\lambda$  s hodnotou  $13 \text{ W} \times \text{m}^{-1} \times ^\circ\text{C}^{-1}$ , je tedy výhodné použít tento typ bimetalu v jističích nebo v termostatech.

Kanthal 60 je dvouvrstvý bimetal se složením Fe/NiMn-steel. Aktivní vrstva je stejně jako u bimetalu Kanthal 155 vyrobena z oceli s niklem a manganem, pasivní strana je vyrobena z železa. Bimetal Kanthal 60 má hodnotu specifického měrného tepelného ohybu  $6,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  a hodnotu specifické měrné tepelné křivosti  $11,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , které jsou výrazně menší než u bimetalu Kanthal 155 a proto se tyto hodnoty řadí mezi nevýhody. Velká výhoda je jeho teplotní rozsah, který se pohybuje od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+450^\circ\text{C}$ , a také rozmezí linearity pohybující se v celém teplotním rozsahu. Mezi další výhody patří jeho tepelná vodivost s hodnotou  $44 \text{ W} \times \text{m}^{-1} \times ^\circ\text{C}^{-1}$ , která je mnohonásobně vyšší než u bimetalu Kanthal 155. Kanthal 60 se používá v zařízeních, kde je vyžadována dobrá linearita při vysokých teplotách, nebo ve vysokoteplotních teploměrech.[1]

## 2.2 Porovnání bimetalu Kanthal 145 a Kanthal 145R10

Kanthal 145 je dvourstvý bimetal se složením 36Ni/NiMn-steel. Aktivní vrstva je vyrobena z oceli s niklem a manganem, pasivní vrstva je ze slitiny Invar. Tento bimetal má relativně vysokou hodnotu měrného tepelného ohybu, konkrétně  $14,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  a také relativně vysokou hodnotu měrné tepelné křivosti, konkrétně  $27,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , při teplotním rozsahu od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+350^\circ\text{C}$ , v extrémních případech až do  $+450^\circ\text{C}$ . Mezi jeho méně kvalitní parametry patří rozsah linearity, který se pohybuje od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+250^\circ\text{C}$ . Za zmínku stojí i jeho hodnota měrného tepelného odporu o hodnotě  $0,79\Omega \times \text{mm}^2 \times \text{m}^{-1}$  či jeho tepelná vodivost o hodnotě  $12 \text{ W} \times \text{m}^{-1} \times ^\circ\text{C}^{-1}$ . Tento bimetal se používá v jističích.

Kanthal 145R10 je třívrstvý bimetal se stejným složením aktivní a pasivní vrstvy jako má bimetal typu Kanthal 145. Kanthal 145R10 má mezi aktivní a pasivní vrstvou tzv. mezivrstvu z mědi. Kanthal 145R10 má mírně vyšší hodnotu měrného tepelného ohybu a měrné tepelné křivosti než Kanthal 145, přesněji má bimetal typu Kanthal 145R10 hodnotu měrného tepelného ohybu  $15 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  a hodnotu měrné tepelné křivosti  $27,8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Oproti bimetalu Kanthal 145 má menší teplotní rozsah, který se pohybuje od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+250^\circ\text{C}$ , v extrémních případech až do  $+400^\circ\text{C}$ . Je-li však bimetal přímo zahříván, rozšíří se jeho teplotní rozsah až do  $+275^\circ\text{C}$ . Rozsah linearity u bimetalu Kanthal 145R10 se pohybuje od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+200^\circ\text{C}$ , jeho rozsah linearity je tedy menší o  $50^\circ\text{C}$  než u bimetalu typu Kanthal 145. Díky

přidané mezivrstvě z mědi má bimetal typu Kanthal145R10 mnohem menší měrný elektrický odpor než bimetal typu Kanthal 145, konkrétně  $0,11\Omega \times mm^2 \times m^{-1}$ , a tudíž má i mnohem větší hodnotu tepelné vodivosti, konkrétně  $70 W \times m^{-1} \times ^\circ C^{-1}$ . Je tedy velice vhodné používat tento bimetal v aplikacích, kde je bimetal přímo ohříván, tedy například v jističích.



## 3 Použití bimetalu

Bimetal má široké použití v různých přístrojích nebo zařízeních, jelikož využívá ke své funkci teplotní roztažnost.

### 3.1 Bimetalový teploměr

Bimetalový pásek je možné použít v teploměrech, kde se nejčastěji využívá ve formě spirály. Jeden z dvou konců spirály je uchycen na plášti zařízení, druhý je připojen k ukazateli teploty. Při zahřátí spirály se volný konec s ukazatelem pohybuje a dojde k vychýlení ukazatele na stupnici. Stupnice je nastavena na určitou teplotu.

### 3.2 Bimetalový termostat

Bimetal je považován za velmi užitečný prostředek ke tvorbě termostatů pro automatické spínání obvodu kontrolující teplotu v různých přístrojích, např. elektrické ohřívače, elektrické žehličky, lednice, elektrické trouby a další. Při používání bimetalu jako termostatu je jeden konec pevně uchycený a připojený ke zdroji, a druhý konec je volný, přičemž je na volném konci uchycený kontakt. Při normální teplotě je bimetal rovný a obvod je spojený. Při zvyšování teploty se bimetal začne ohýbat až dojde k rozpojení obvodu. Po následném snížení teploty dojde k opětovnému spojení obvodu. Bimetal je možné použít ve formě pásku, může se však použít i ve formě spirály, jelikož v důsledku větší délky má i větší citlivost.

### 3.3 Spínací přístroje

Bimetal se často vyskytuje ve spínacích přístrojích, kde úkolem bimetalu je rozpoznávat a chránit před nadproudy. Bimetal se používá v různých spínacích přístrojích, např. relé, ochrana před přetížením motoru či jističe. V jističi je bimetal ohříván přímo procházejícím proudem nebo nepřímo topným páskem. Při ohřátí bimetalu dochází k jeho průhybu a rozpojení obvodu. [11]

## 4 Požadavky norem na jističe

### 4.1 Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalací

Následující podkapitoly se zabývají normou ČSN EN 60898-1 Elektrická příslušenství - Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalací - Část 1: Jističe pro střídavý provoz (AC).

#### 4.1.1 Standardní podmínky pro funkci v provozu

Jističe, které odpovídají normě ČSN EN 60898-1, musí pracovat za následujících standardních podmínek.

- **Rozsah teploty okolního vzduchu**

Teplota okolního vzduchu nesmí překročit  $+40\text{ °C}$  a průměr teploty nesmí překročit  $+35\text{ °C}$  během 24 hodin. Dolní mez teploty okolního vzduchu je  $-5\text{ °C}$ . Pokud jsou jističe používány v oblastech, kde teplota okolního vzduchu přesahuje  $+40\text{ °C}$  nebo je nižší než  $-5\text{ °C}$ , musí být speciálně navrženy nebo používány podle informací uvedených v katalogu výrobce.

- **Nadmořská výška**

Instalace jističe obecně nepřesahuje nadmořskou výšku 2000 m. Pokud se jističe instalují ve nadmořských výškách, které přesahují 2000 m, je nutné vzít v úvahu snížení dielektrické pevnosti a chladicího účinku vzduchu. Tyto jističe musí být speciálně navrženy nebo používány podle dohody mezi výrobcem a uživatelem.

- **Atmosférické podmínky**

Relativní vlhkost vzduchu nepřesáhne 50% při maximální teplotě  $+40\text{ °C}$ . Při nižších teplotách může být přípustná i vyšší relativní vlhkost, například při  $+20\text{ °C}$  vlhkost 90%.

- **Podmínky instalace**

Je nutné instalovat jistič podle pokynů výrobce.

- **Stupeň znečištění**

Podle této normy jsou jističe určeny k použití v prostředí se stupněm znečištění 2 - vyskytuje se pouze nevodivé znečištění. Příležitostně lze počítat i s

dočasnou vodivostí, která je způsobena kondenzací.[5]

### 4.1.2 Požadavky na konstrukci a činnost jističe

Jističe je nutné navrhovat a konstruovat tak, aby při normálním použití byla činnost jističe spolehlivá a bezpečná pro uživatele a okolí.

- **Meze oteplení**

Oteplení částí jističe nesmí překročit hodnoty stanovené v Tab. 4.1, které jsou měřeny za podmínek uvedených v kapitole. Poškození jističe nesmí být takové, aby zhoršilo jeho funkci a bezpečnost použití. Tyto meze uvedené v Tab. 4.1 platí pouze tehdy, zůstane-li teplota okolí v definovaném rozmezí podle rozsahu teplot okolního vzduchu.

Tab. 4.1: Hodnoty oteplení (převzato z [5])

Části <sup>ab</sup>	Oteplení [K]
Svorky pro vnější spoje <sup>c</sup>	60
Vnější části , kterých je možno se dotknout během ručního ovládání jističe, včetně ovládacích prvků z izolačního materiálu a kovových prostředků pro spojení izolovaných ovládacích prvků několika pólů	40
Vnější kovové části ovládacích prvků	25
Jiné vnější části včetně čelní plochy jističe, která je v přímém kontaktu s montážním povrchem	60
<sup>a</sup> Pro kontakty není specifikována žádná hodnota, protože konstrukční provedení většiny jističů je takové, že přímé měření teploty těchto částí není možno provádět bez rizika, že dojde ke změnám nebo posunům částí, které by mohli ovlivnit reprodukovatelnost zkoušek. 28 denní zkouška je považována za dostatečnou pro nepřímou kontrolu chování kontaktů se zřetelem na nadměrné přehřívání v provozu.	
<sup>b</sup> Pro jiné části, než jsou zde uvedeny, není specifikována žádná hodnota, ale sousední části z izolačních materiálů nesmí být nijak poškozeny a činnost jističe nesmí být zhoršena.	
<sup>c</sup> U jističů odnímatelného typu svorky základové desky, na níž jsou instalovány.	

- **Nepřerušovanost provozu**

Jistič musí fungovat spolehlivě i v dlouhodobém provozu.

- **Vliv jednopólového zatížení vícepólových jističů na vypínací charakteristiku**

Vícepólové jističe, které mají více jištěných pólů a jsou zatěžovány pouze u jednoho pólu, musí vybavit při:

- 1,1x smluveného vypínacího proudu u dvojpólových jističů
- 1,2x smluveného vypínacího proudu u trojpólových i čtyřpólových jističů

Předpokládá se, že jistič je ve výchozím stavu - studený stav. Jistič musí vybavit během smluvené doby.

- **Vliv teploty okolního vzduchu na vypínací charakteristiku**

Při teplotách okolního vzduchu, které jsou jiné než referenční teplota a jsou v rozmezí od  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , je nepřijatelné, aby jakýmkoliv způsobem ovlivnili vypínací charakteristiku jističe.

- **Automatická činnost**

Vypínací charakteristika jističe musí být vytvořena tak, aby jističe zajišťovaly dostatečnou ochranu obvodu, aniž by zapůsobila předčasně. Tab. 3.2 obsahuje podmínky a hodnoty, které definují vypínací charakteristiky jističe, přičemž se vztahuje k jističi namontovaném v souladu s referenčními podmínkami pracujícím při kalibrační referenční teplotě  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  s tolerancí  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zkouška se může provést i pro jinou teplotu, výsledky se však vztahují k  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  při použití informací uvedených výrobcem. Změna zkušebního proudu z Tab. 3.2 nesmí překročit 1,2% na  $K$  změny kalibrační teploty. Mají-li jističe uvedenou jinou kalibrační teplotu než  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zkouší se za uvedené teploty.[5]

### 4.1.3 Smluvené veličiny

- **Smluvená doba**

Jedna hodina pro jističe se jmenovitým proudem do 63 A včetně , a dvě hodiny pro jističe se jmenovitým proudem nad 63 A.

- **Smluvený nevypínací proud ( $I_{nt}$ )**

1,13x jmenovitého proudu jističe.

- **Smluvený vypínací proud ( $I_t$ )**

1,45x jmenovitého proudu jističe.[5]

Tab. 4.2: Pracovní charakteristiky čas-proud (převzato z [5])

Zkouška	Typ	Zkušební proud	Počáteční stav	Meze vypínací nebo nevypínací doby	Výsledky, kterých má být dosaženo	Poznámky
a	B,C,D	$1,13 I_n$	Studený <sup>a</sup>	$t \leq 1h$ (pro $I_n \leq 63 A$ ) $t \leq 2h$ (pro $I_n > 63 A$ )	Žádné vypnutí	
b	B,C,D	$1,45 I_n$	Okamžitě po zkoušce a	$t < 1h$ (pro $I_n \leq 63 A$ ) $t < 2h$ (pro $I_n > 63 A$ )	Vypnutí	Proud se plynule zvyšoval během 5s
c	B,C,D	$2,55 I_n$	Studený <sup>a</sup>	$1 s < t < 60 s$ (pro $I_n \leq 32 A$ ) $1 s < t < 120 s$ (pro $I_n > 32 A$ )	Vypnutí	

<sup>a</sup> Termín studený znamená bez předchozího zatěžování při referenční kalibrační teplotě.

## 4.2 Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Jističe

Následující podkapitola se zabývá normou ČSN EN 60947-2: Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 2: Jističe.

### 4.2.1 Základní parametry jističe

- **Jmenovitá napětí**
  - **Jmenovité pracovní napětí** ( $U_e$ )  
 $U_e$  je napětí mezi fázemi.
  - **Jmenovité izolační napětí** ( $U_i$ )
  - **Jmenovité impulzní výdržné napětí** ( $U_{imp}$ )
- **Proudy**
  - **Smluvený tepelný proud bez krytu** ( $I_{th}$ )
  - **Smluvený tepelný proud v krytu** ( $I_{the}$ )
  - **Jmenovitý proud** ( $I_n$ )  
Jmenovitý proud je jmenovitý trvalý proud ( $I_u$ ) a nabývá hodnot smluveného tepelného proudu bez krytu ( $I_{th}$ ).
- **Jmenovitý kmitočet**
- **Jmenovitý provoz**
  - Provoz po dobu 8 hodin
  - Neustálý provoz
- **Jmenovitá zkratová zapínací schopnost** ( $I_{cm}$ )  
Hodnota zkratové zapínací schopnosti přidělená výrobcem pro jmenovité pracovní napětí ( $U_e$ ) při jmenovitém kmitočtu a pro střídavý proud při určeném účinníku, nebo pro stejnosměrný proud při určené časové konstantě. Schopnost jističe zapnout proud shodný s hodnotou jmenovité zkratové zapínací schopnosti ( $I_{cm}$ ) při přiložení určitého napětí vztaženého ke jmenovitému pracovnímu napětí ( $U_e$ ).

- Pro stejnosměrný proud je nutné, aby hodnota ( $I_{cm}$ ) nebyla menší než jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost.
- Pro střídavý proud je nutné, aby hodnota ( $I_{cm}$ ) nebyla menší než jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost vynásobená činitelem  $n$  dle smluvených hodnot.

- **Jmenovité zkratové vypínací schopnosti**

Hodnoty zkratové vypínací schopnosti přidělené jističi výrobcem pro jmenovité pracovní napětí  $U_e$  za určených podmínek. Tato schopnost vyžaduje, aby byl jistič schopen vypnout libovolnou hodnotu zkratového proudu do a včetně hodnoty odpovídající jmenovité schopnosti při zotaveném napětí průmyslového kmitočtu, který odpovídá předepsaným hodnotám zkušebního napětí, a:

- při střídavém proudu s libovolným účínkem, který je větší než stanovený účíněk.
- při stejnosměrném proudu s libovolnou časovou konstantou, která je menší než předepsaná časová konstanta.

Pokud je zotavené napětí kmitočtu větší než předepsaná hodnota zkušebního napětí, zkratové zkoušky se nezaručují.

- **Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost ( $I_{cu}$ )**

Hodnota předpokládané hodnoty vypínacího proudu v kA (pokud je střídavý proud, jedná se o efektivní hodnotu střídavé složky), která je přiřazená výrobcem pro náležité jmenovité pracovní napětí ( $U_e$ ) za určitých podmínek ve sledu 3.

- **Jmenovitá provozní zkratová vypínací schopnost ( $I_{cs}$ )**

Hodnota předpokládané hodnoty vypínacího proudu v kA nebo v % ( $I_{cu}$ ), kdy minimální hodnota ( $I_{cs}$ ) se rovná 25 % ( $I_{cu}$ ). Tato hodnota je přiřazená výrobcem pro náležité jmenovité pracovní napětí ( $U_e$ ) za určených podmínek ve sledu 2.

- **Jmenovitý krátkodobý výdržný proud ( $I_{cw}$ )**

Hodnota proudu stanovená výrobcem za zkušebních podmínek určených ve sledu 4. U střídavého proudu jde o efektivní hodnotu střídavé složky zkratového

proudu, u kterého se předpokládá, že zůstane během krátkodobé prodlevy konstantní. Minimální hodnota krátkodobé prodlevy je stanovena na 0,05 s, přičemž další hodnoty jsou 0,05 s - 0,1 s - 0,25 s - 0,5 s - 1 s. Minimální hodnoty výdržného proudu jsou uvedeny v Tab. 4.3. [6]

Tab. 4.3: Nejnižší hodnoty jmenovitého krátkodobého výdržného proudu (převzato z [6])

$I_n$ A	$I_{cw}$ - Minimální hodnoty kA
$I_n \leq 2500$	$12I_n$ nebo 5 kA (bere se větší hodnota)
$I_n > 2500$	30 kA

## 4.3 Zkoušky jističů

### 4.3.1 Zkušební sled 1: Obecné provozní vlastnosti

Platí pro všechny jističe.

- **Závislé časové spouště**

Ověření pracovní charakteristiky závislých časových spouští na přetížení se řídí předepsanými požadavky na funkci. Pracovní charakteristiky se musí ověřit při referenční teplotě při napájení spouště ve všech fázových pólech. Je-li zkouška provedena při jiné teplotě než referenční, provádí se korekce podle závislosti teplota/proud udávaná výrobcem. Pokud je prováděna zkouška u jističů s identifikovaným nulovým pólem vybaveným spouští na přetížení, zkušební proudy musí odpovídat hodnotám v Tab. 4.4, ale při smluveném vypínacím proudu je zkušební proud vynásoben hodnotou 1,2.

Tab. 4.4: Vypínací charakteristiky závislých časových nadproudových vypínacích spouští při referenční teplotě (převzato z [6])

Všechny póly zatížené	Všechny póly zatížené	Smluvená doba
Smluvený nevypínací proud	Smluvený vypínací proud	[h]
1,05x proudového nastavení	1,30x proudového nastavení	2 <sup>a</sup>
<sup>a</sup> 1 hodina, pokud je $I_n \leq 63$ A		

Je-li zkouška prováděna u tepelně-magnetických spouští, které jsou nezávislé na teplotě okolního vzduchu podle informací uvedených výrobcem, pracovní



charakteristiky se ověřují dvěma měřeními. První měření při  $30\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , druhé měření při  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  nebo při  $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , spoušť se však musí napájet ve všech fázových pólech. Ověření pracovní charakteristiky u elektronických spouští se provádí při teplotě okolí zkušební místnosti, spoušť je opět napájena ve všech fázových pólech. V případě, kdy hodnota proudu je dohodnutá mezi výrobcem a uživatelem, je provedena doplňková zkouška, aby se ověřilo, zda charakteristiky spouště čas/proud odpovídají v rámci tolerance křivkám poskytnutým výrobcem.

- **Činnost při přetížení**

Tato zkouška se provádí pro jističe, které mají jmenovitý proud do 630 A včetně. Stav a způsob instalace musí odpovídat obecným normativním požadavkům. Zkouška se provádí při napětí, které je rovno maximálnímu pracovnímu napětí  $U_{emax}$  jističe přidělené výrobcem s ohledem na požadavek na zotavené napětí z Tab. 4.5.

Tab. 4.5: Charakteristiky obvodu pro zkoušku činnosti při přetížení (převzato z [6])

	AC	DC
Proud	$6 I_n$	$2,5 I_n$
Zotavené napětí	$1,05 U_{emax}$	$1,05 U_{emax}$
$U_{emax}$ = maximální pracovní napětí jističe		

Má-li jistič nastavitelné spouště, zkoušky se provádí se spouštěmi nastavenými na maximum. Při zkoušce se jistič devětkrát vypne ručně a třikrát automaticky působením spouště na přetížení. Výjimka platí pro ty jističe, které mají při maximálním nastavení zkratovou spoušť menší než zkušební proud - všech 12 operací musí být automatických. Nevydrží-li zkušební prostředky omezenou energii, která se vyskytuje v průběhu automatické činnosti, zkoušku je možno provést se souhlasem výrobce jiným způsobem:

- Zkouška je provedena 12 ručními operacemi.
- Zkouška je provedena se třemi přídatnými operacemi s automatickým vypnutím, které se vykonají s libovolně vhodným napětím.

Při všech cyklech, kdy je využito ruční ovládání, musí jistič zůstat zapnutý po dostatečně dlouho dobu, aby bylo zajištěno ustanovení proudu. Tato doba však nesmí být delší než 2 s. Množství spínaných cyklů za hodinu musí odpovídat normativním požadavkům. Pokud však nedojde k zablokování jističe, je

možné snížit množství spínání na takovou hodnotu, aby došlo k zapnutí jističe, zároveň však proud dosáhne plné hodnoty. Hodnoty zkušební proud a zotaveného napětí se musí rovnat hodnotám uvedeným v Tab. 5.3 při určitém účinníku nebo časové konstantě. Při zkouškách jističů pro střídavý proud se zkoušky provádí v rozmezí kmitočtu od 45 Hz do 62 Hz. Minimální předpokládaný proud na svorkách napájení jističe je roven desetinasobku zkušební proud, nebo minimálně 50 kA (záleží, která z těchto hodnot je menší).

- **Ověření spouští na přetížení**

Tato zkouška musí být provedena okamžitě po ověření oteplení při 1,45x proudového nastavení spouští při referenční teplotě, a všech spojených pólech do série nebo při použití třífázového zdroje. Zkoušku je možné provést při libovolném vhodném napětí. Za žádných okolností nesmí doba působení překročit dohodnutou dobu vybavení. Je-li spoušť závislá na teplotě okolí, zkoušku je možno provádět alternativně při teplotě okolního vzduchu při zkušebním proud, který je korigován podle údajů závislosti teplota/proud dané výrobcem. Je možné využít časový interval mezi zkouškou ověření oteplení a zkouškou ověření spouští na přetížení v případě souhlasu výrobce.[6]

#### **4.3.2 Zkušební sled 2: Jmenovitá provozní zkratová vypínací schopnost**

Tento zkušební sled platí pro všechny jističe kromě případů, kdy se provádí zkušební sled 6.

- **Ověření spouští na přetížení**

Okamžitě po provedení zkoušky ověření oteplení se provede zkouška ověřující funkci spouští na přetížení podle zkoušky ověření spouští na přetížení popsané v zkušebním sledu 1. Je-li dán souhlas výrobce, je možné využít časový interval mezi zkouškou ověření oteplení a zkouškou ověření spouští na přetížení.[6]

#### **4.3.3 Zkušební sled 3: Jmenovitá mezní zkratová vypínací schopnost**

Tento zkušební sled platí pro jističe, které spadají do kategorie selektivity A a pro jističe kategorie selektivity B, které mají větší jmenovitou mezní zkratovou vypínací schopnost než jmenovitý krátkodobý výdržný proud. Pokud jističe spadající do kategorie selektivity B mají jmenovitý zkratový výdržný proud rovný jejich jmenovité mezní zkratové vypínací schopnosti, zkušební sled 3 je možné vynechat, jelikož se

mezní zkratová vypínací schopnost ověří ve zkušebním sledu 4.

- **Ověření spouští na přetížení**

Ověření funkce spouští na přetížení se provádí na každém pólu zvlášť při dvojnásobku hodnoty proudového nastavení. Tuto zkoušku je možno provádět pro libovolné napětí. Pokud se teplota okolí liší od referenční teploty, je nutné, aby se zkušební proud u teplotně závislých spouští korigoval podle údajů závislosti teplota/proud udávané výrobcem. Po zkoušce ověření elektrické pevnosti se provede zkouška ověření spouští na přetížení, kde zkušební proud je 2,5x hodnoty proudového nastavení. Doba působení nesmí za žádných okolností překročit maximální hodnotu, která byla stanovena výrobcem pro dvojnásobek proudového nastavení na každém pólu zvlášť při referenční teplotě.[6]

## 5 Výpočet bimetalu

Při výpočtu bimetalu je nutné zvážit následující faktory:

- Požadovaný průhyb
- Působení vnějších sil
- Přípustné ohybové napětí
- Objem bimetalu
- Způsob výroby
- Velikost prostoru

U všech rovnic výpočtu bimetalu, které jsou zaznamenány v následujících dvou kapitolách, je důležité mít na paměti, že tyto rovnice jsou přinejlepším pouze přibližné. Jsou však dobrým podkladem pro návrh. Po předběžném stanovení typu bimetalu, jeho tvaru a rozměrů, by měl být bimetal testován za skutečných provozních podmínek s ohledem na maximální bezpečné napěťové namáhání při provozní teplotě.[1][3]

### 5.1 Jednostranně upevněný bimetal obdélníkového tvaru

Vztahy pro výpočet bimetalového pásu obdélníkového tvaru dle [1] a [3]:

- Průhyb bimetalu při změně teploty

$$A = \frac{a \times (T_1 - T_0) \times L^2}{s} \quad (5.1)$$

- Průhyb bimetalu při působení protisíly  $F_u$  a konstantní teplotě

$$A = \frac{4 \times F_u \times L^3}{E \times s^3 \times b} \quad (5.2)$$

- Průhyb bimetalu při působení protisíly  $F_u$  a změně teploty

$$A = \frac{a \times (T_1 - T_0) \times L^2}{s} - \frac{4 \times F_u \times L^3}{E \times s^3 \times b} \quad (5.3)$$

- Úhel mezi volným koncem bimetalu a jeho původní polohou při změně teploty

$$\varphi = \frac{2 \times a \times (T_1 - T_0) \times L}{s} \times \frac{360}{2\pi} \quad (5.4)$$

- Síla vyvíjená bimetalem při omezeném průhybu

$$F_m = \frac{E \times b \times s^3 \times A}{4 \times L^3} \quad (5.5)$$

- Síla vyvíjená bimetalem při omezeném průhybu při změně teploty

$$F_t = \frac{E \times s^2 \times a \times b \times (T_1 - T_0)}{4 \times L} \quad (5.6)$$

- Maximální ohybové napětí

$$\sigma_{max} = \frac{6 \times F_{max} \times L}{s^2 \times b} \quad (5.7)$$

- Maximální síla vyvíjená páskem

$$F_{max} = \frac{\sigma_{max} \times s^2 \times b}{6 \times L} \quad (5.8)$$

- Teplota

$$T_1 - T_0 = \Delta T = T_A + T_F \quad (5.9)$$

- Oteplení použité na průhyb

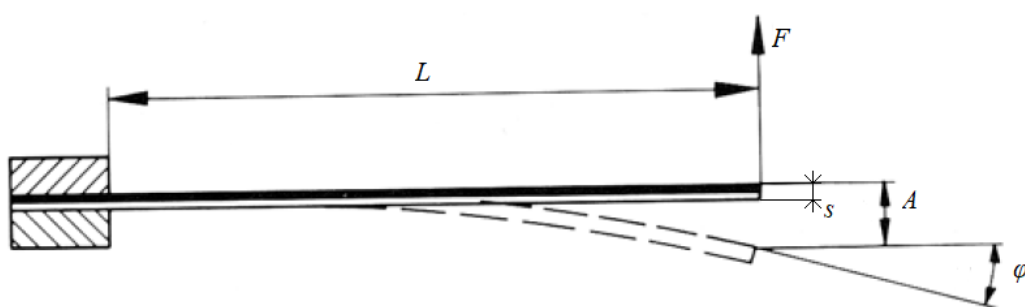
$$T_A = \frac{A \times s}{a \times L^2} \quad (5.10)$$

- Oteplení použité na vyvinutí síly

$$T_F = \frac{4 \times F \times L^3}{a \times E \times b \times s^2} \quad (5.11)$$

- Pokud je oteplení použité na průhyb rovné otelení použitému na vyvinutí síly ( $T_a = T_a = 0,5\Delta T$ ), lze teoreticky určit minimální objem pásku

$$V_{min} = \frac{16 \times F \times A}{E \times a^2 \times \Delta T^2} \quad (5.12)$$



Obr. 5.1: Definice rozměrů jednostranně upevněného bimetalu obdélníkového tvaru (převzato z [1])

## 5.2 Jednostranně upevněný bimetal zkoseného tvaru

Vztahy pro výpočet bimetalového pásku zkoseného tvaru dle [7]:

- Průhyb bimetalu při změně teploty

$$A = \frac{a \times (T_1 - T_0) \times L^2}{s} \quad (5.13)$$

- Maximální síla vyvíjená páskem

$$F_{max} = \frac{\sigma_{max} \times s^2 \times b_1}{6 \times L} \quad (5.14)$$

- Síla vyvíjená bimetalem při omezeném průhybu

$$F_m = \frac{E \times b_1 \times \Psi \times s^3}{12 \times L^3} \times A \quad (5.15)$$

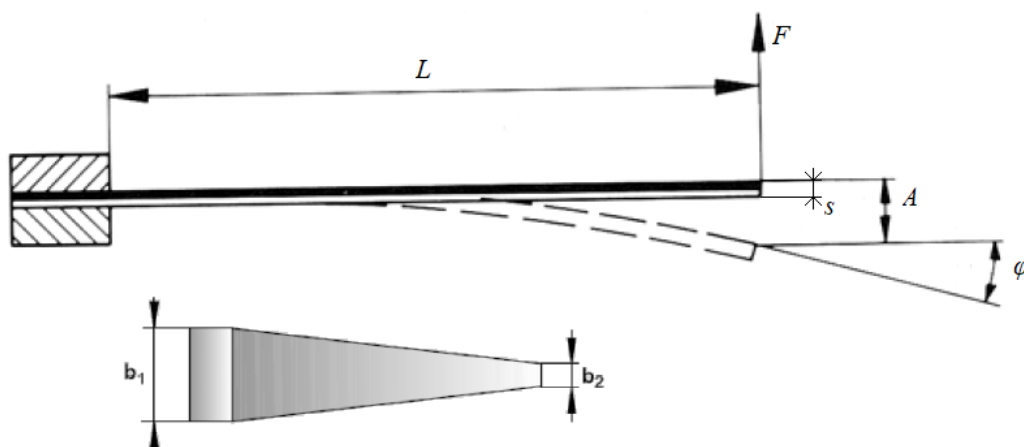
- Síla vyvíjená bimetalem při změně teploty:

$$F_t = \frac{a \times E \times b_1 \times \Psi \times s^2}{12 \times L} \times (T_1 - T_0) \quad (5.16)$$

- Výpočet koeficientu  $\Psi$ :

$$\Psi = \frac{2 \times (1 - n)^3}{n^2[3 + 4,605 \times \log(\frac{1}{n})] - 4 \times n + 1} \quad (5.17)$$

$$n = \frac{b_2}{b_1} \quad (5.18)$$



Obr. 5.2: Definice rozměrů jednostranně upevněného bimetalu zkoseného tvaru (převzato z [1] a [7])

## 6 Měření bimetalů

Jedním z cílů práce bylo provést měření potřebných hodnot na zvolených bimetalech, konkrétně měření volného průhybu bimetalu. Toto měření bylo provedeno na bimetalu u třech různých jističů, konkrétně na kompaktním jističi Siemens 160A, domovním jističi EATON FAZ-C10/1 a domovním jističi OEZ LSN-2B-1.

Z každého jističe byla odstraněna západka, aby při ohybu bimetalu nedošlo k vybavení jističe. U kompaktního jističe Siemens 160A byla oddělena spodní plastová část, aby se mohlo provést měření na bimetalu. V plastových obalech domovních jističů EATON FAZ-C10/1 a OEZ LSN-2B-1 byl vytvořen otvor, aby se také mohlo provést měření na bimetalu. Dále byly připevněny termočlánky typu K na bimetaly za účelem měření teploty. U kompaktního jističe Siemens 160A byly připevněny 3 termočlánky na patu, střed a špičku bimetalu. U domovních jističů EATON FAZ-C10/1 a OEZ LSN-2B-1 byly připevněny 2 termočlánky na patu a špičku bimetalu. Měření probíhalo při jmenovitém proudu a také podle smluveného vypínacího proudu 1,30 násobek jmenovitého proudu pro průmyslové jističe a 1,45 násobek jmenovitého proudu pro domovní jističe podle příslušných norem.

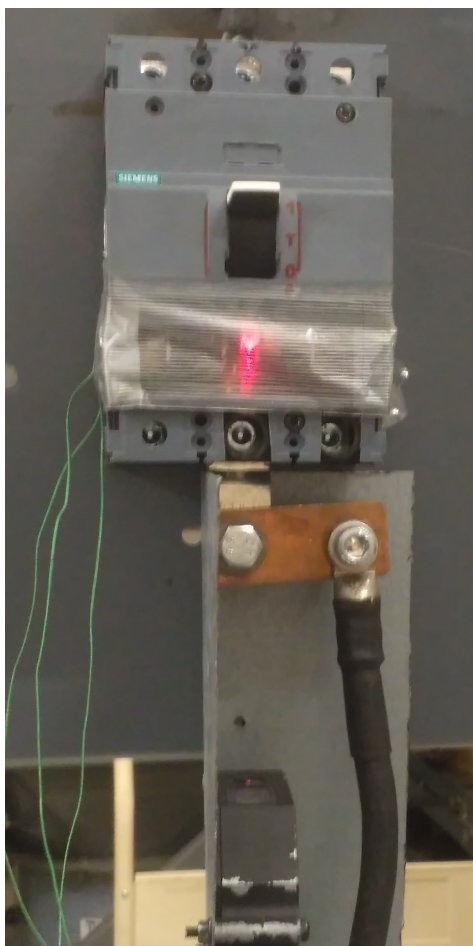
### 6.1 Měření volného průhybu bimetalu

#### 6.1.1 Postup měření u jističe Siemens 160A

Před samotným měřením bylo nejdříve sestaveno měřící pracoviště. Kompaktní jistič Siemens 160A byl připevněn na stojan a laserový snímač vzdálenosti optoNCDT byl umístěn kolmo k jističi a přímo pod jistič ve vzdálenosti 16 cm (viz. Obr. 6.1). Měřící pracoviště pro měření kompaktního jističe Siemens 160A bylo zapojeno podle schématu zapojení z Obr. 6.2. Měření probíhalo pouze na prostředním pólu jističe. Všechny měřené hodnoty byly zaznamenány pomocí měřící ústředny AHLBORN ALMEMO, do které bylo přivedeno 6 vstupů. První tři vstupy byly použity na měření teploty pomocí termočlánků umístěných na bimetalového pásku. Další vstup byl použit na měření okolní teploty, která byla také měřena pomocí termočlánku. Měřič teploty okolí byl umístěn ve stejné výšce jako jistič a ve vzdálenosti 1 m od samotného jističe. Poslední dva vstupy byly použity na měření průhybu bimetalu a na měření procházejícího proudu. Hodnoty z měření průhybu bimetalu byly zaznamenány pomocí napětí a následně byly přepočítány na požadované hodnoty podle převodu 1mm/1V. Proud byl měřený proudovou sondou IT 200-S ULTRASTAB, změřené hodnoty byly zaznamenány pomocí napětí a následně byly přepočítány na požadované hodnoty podle převodu 98,01A/1V. Při měření kompaktního jističe Siemens 160A byla také použita proudová sonda IT 700-S ULTRASTAB, jelikož

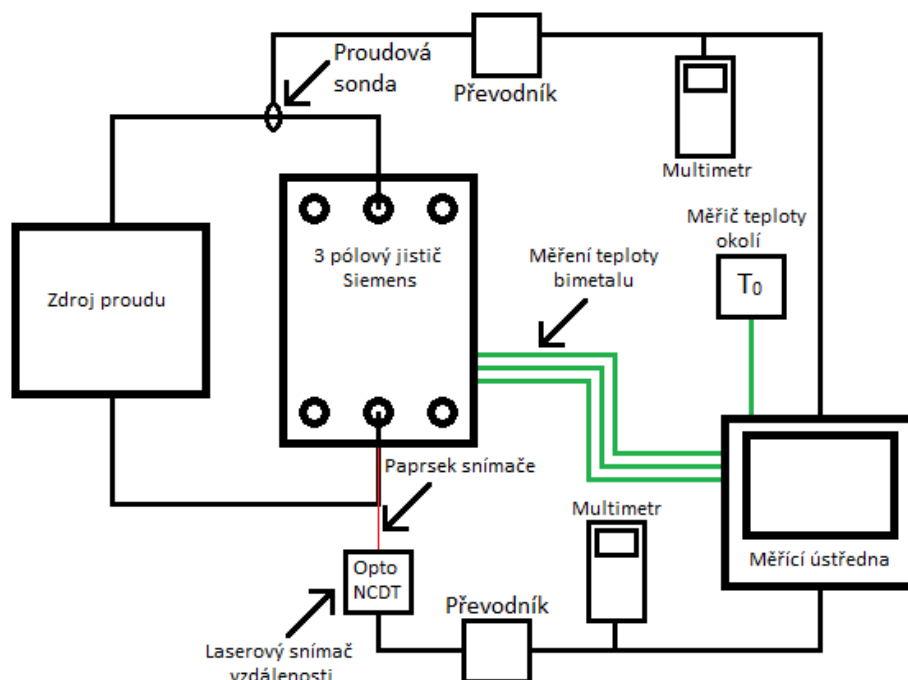
byl průchozí proud jističem větší, než měřicí rozsah proudové sondy IT 200-S ULTRASTAB. Změřené hodnoty proudovou sondou IT 700-S ULTRASTAB byly také následně přepočítány na požadované hodnoty pomocí převodu 100,1A/1V. Byly také použity dva multimetry HEXAGON, které sloužily ke kontrole měřených hodnot (průhyb a proud) a pro přesnější nastavení proudu ze zdroje.

Před zahájením samotného měření byly zaznamenány původní hodnoty teplot bimetalu, teploty okolí a výchozí poloha bimetalu. Měřicí ústředna AHLBRON AL-MEMO zaznamenávala měřené hodnoty na paměťovou kartu v časovém intervalu 30 s po celou dobu měření. V první části měření byl nastaven na zdroji jmenovitý proud kompaktního jističe Siemens  $I_n = 160 \text{ A}$  a tento proud se udržoval do té doby než došlo k ustálenému průběhu oteplení bimetalu. Následně byl proud zvýšen dle normy na  $1,30 \times I_n = 208 \text{ A}$  a byl udržován po celou dobu měření než znovu došlo k ustálenému průběhu oteplení bimetalu. Po ukončení měření na kompaktním jističi Siemens 160A byla data z paměťové karty stažena na počítač a dále zpracována.



Obr. 6.1: Zapojení kompaktního jističe Siemens 160A a snímače vzdálenosti





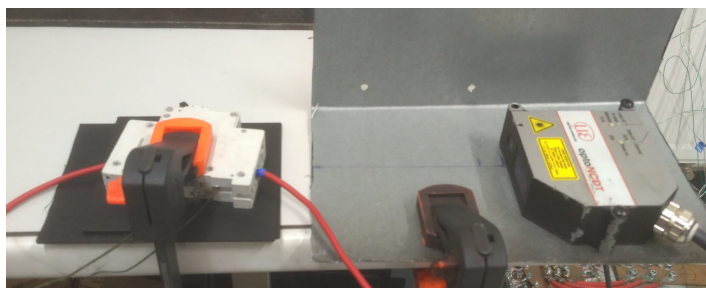
Obr. 6.2: Schéma zapojení pro měření kompaktního jističe Siemens 160A

### 6.1.2 Postup měření u domovních jističů EATON 10A a OEZ 2A

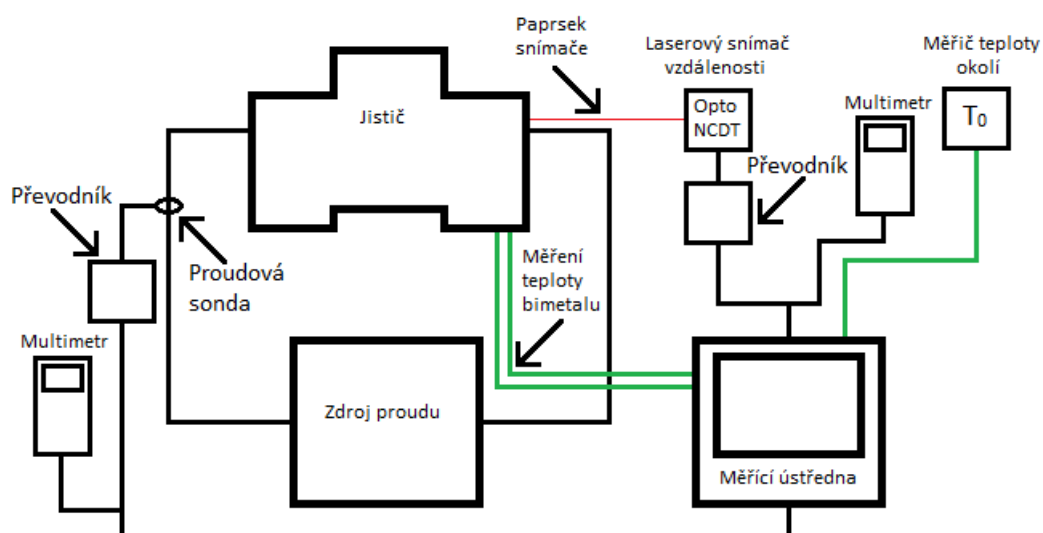
Nejdříve bylo sestaveno měřicí pracoviště. Domovní jistič EATON 10A a OEZ 2A byl připevněn na stůl a laserový snímač vzdálenosti byl umístěn vodorovně k jističi ve vzdálenosti 16 cm (viz. Obr. 6.3). Při měření domovních jističů EATON 10A a OEZ 2A bylo měřicí pracoviště zapojeno podle schématu zapojení z Obr. 6.4. Všechny měřené hodnoty byly zaznamenány pomocí měřicí ústředny AHLBORN ALMEMO, do které bylo přivedeno 5 vstupů. První dva vstupy byly použity na měření teploty pomocí termočlánků umístěných na bimetalového pásku. Další vstup byl použit na měření okolní teploty, která byla také měřena pomocí termočlánku. Měřič teploty okolí byl umístěn ve stejné výšce jako jistič a ve vzdálenosti 1 m od samotného jističe. Poslední dva vstupy byly použity na měření průhybu bimetalu a na měření procházejícího proudu. Hodnoty z měření průhybu bimetalu byly zaznamenány pomocí napětí a následně byly přepočítány na požadované hodnoty podle převodu 1mm/1V. Proud byl měřený pomocí proudové sondy IT 200-S ULTRASTAB, změřené hodnoty byly zaznamenány pomocí napětí a následně byly přepočítány na požadované hodnoty podle převodu 98,01A/1V.

Stejně jako u měření kompaktního jističe Siemens 160A se nejdříve při měření domovních jističů EATON 10A a OEZ 2A zaznamenaly původní hodnoty teplot

bimetalu, teploty okolí a výchozí poloha bimetalu. Měřicí ústředna AHLBORN AL-MEMO zaznamenávala měřené hodnoty v časovém intervalu 15 s po celou dobu měření. V první části měření domovního jističe EATON 10A byl nastaven jmenovitý proud  $I_n = 10\text{ A}$  a udržován do ustáleného průběhu oteplení bimetalu. Následně byl proud zvýšen dle normy na  $1,45 \times I_n = 14,5\text{ A}$  a byl udržován po celou dobu měření než znovu nastal ustálený průběh oteplení bimetalu. Při měření domovního jističe OEZ 2A byl nejdříve nastaven jmenovitý proud  $I_n = 2\text{ A}$  a tento proud byl udržován do ustáleného průběhu oteplení bimetalu. Následně byl proud zvýšen dle normy na  $1,45 \times I_n = 2,9\text{ A}$  a tento proud byl také udržován do ustáleného průběhu oteplení bimetalu. Po ukončení každého měření na domovním jističi EATON 10A a OEZ 2A byly zaznamenané hodnoty staženy z paměťové karty na počítač a dále zpracovány.



Obr. 6.3: Zapojení domovního jističe EATON 10A a OEZ 2A a snímače vzdálenosti



Obr. 6.4: Schéma zapojení pro měření domovních jističů EATON 10A a OEZ 2A

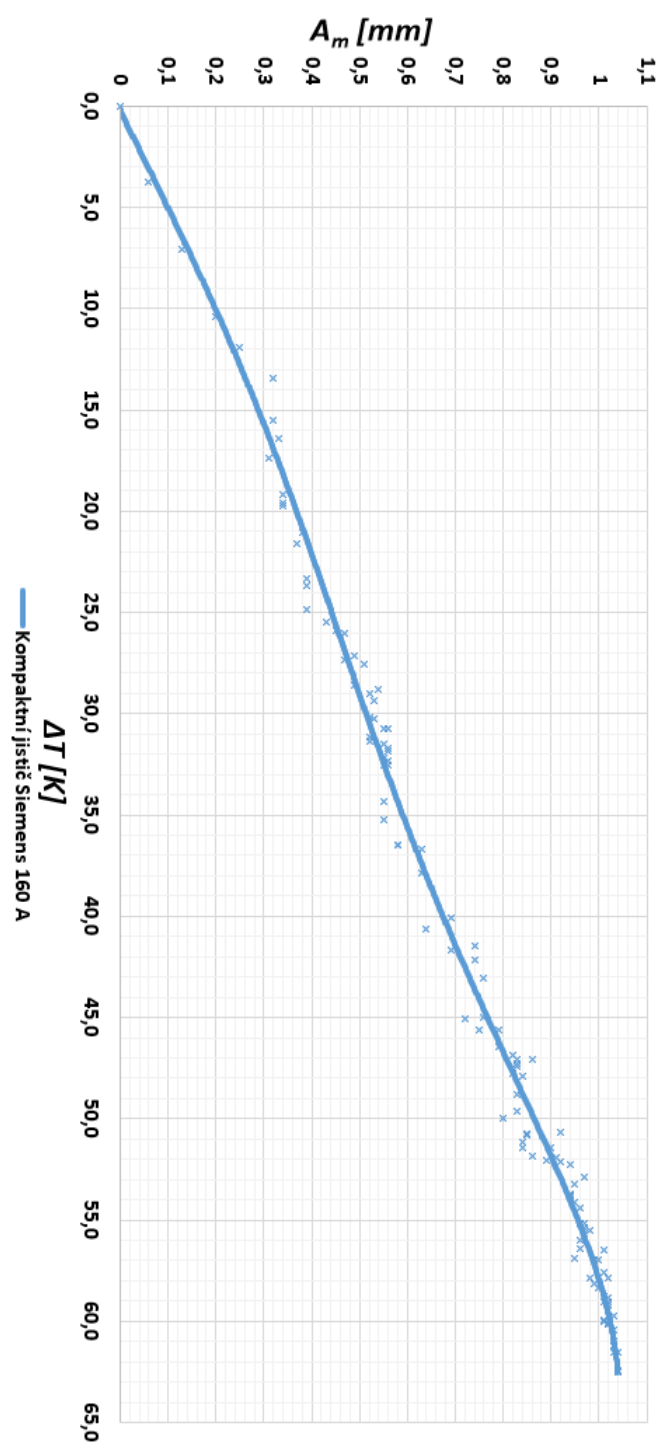
### 6.1.3 Použité měřicí přístroje

Tab. 6.1: Seznam přístrojů použitých pro měření volného průběhu bimetalu

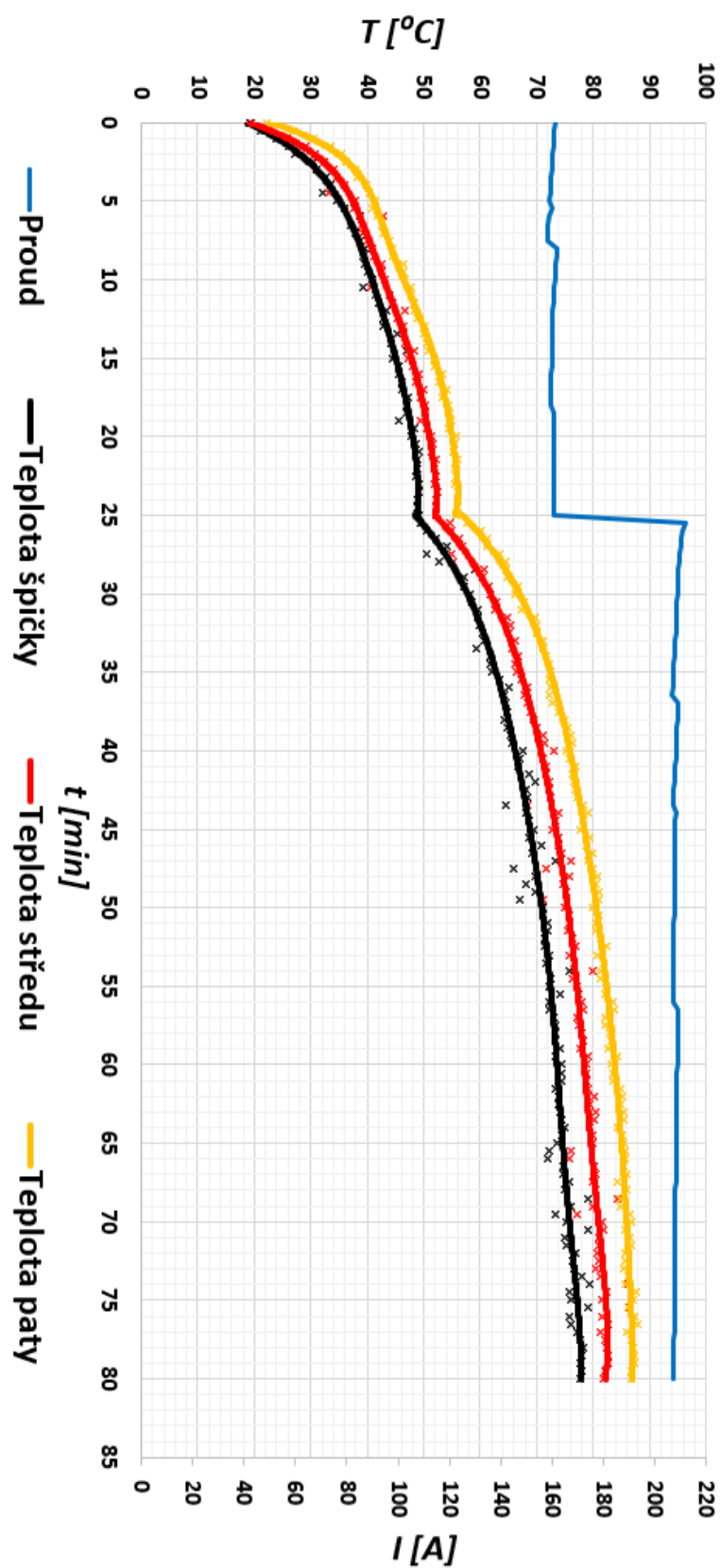
Název	Typ	Technické informace	Výrobní číslo	Výrobce
Zdroj proudu	-	-	-	-
Laboratorní zdroj	-	230 V	-	-
Laserový snímač vzdálenosti	opto NCDT	$\lambda = 670 \text{ nm}$ Analogový DC výstup 0-10V	-	MICRO-EPSILON
Multimetr HEXAGON	340A	při 50 Hz přesnost AC napětí $\pm (0,5 \text{ ze čtení} + 3 \text{ digit})$ v celém rozsahu měření [12]	MFR: 122180532	AMPROBE
Multimetr HEXAGON	340A	při 50 Hz přesnost DC napětí $\pm (0,08 \text{ ze čtení} + 2 \text{ digit})$ pro rozsah 50V[12]	MFR: 122180534	AMPROBE
Měřicí modul ALMEMO	ZA 9900-AB3	Rozsah DC $\pm 20\text{V}$ Přesnost $\pm 0,1\%$ Rozlišení 0,01 V [8]	17070173	AHLBRON
Měřicí modul ALMEMO	ZA 9903-AB3	Rozsah AC $\pm 13\text{V}$ Přesnost $\pm 0,1\%$ Rozlišení 0,01 V [9]	19010035	AHLBRON
Proudová sonda	IT 200-S ULTRASTAB	Rozsah $\pm 200\text{A}$ Přesnost 0,0084%[13]	1142720046	LEM
Proudová sonda	IT 700-S ULTRASTAB	Rozsah $\pm 700\text{A}$ Přesnost 0,00535% [14]	1152660013	LEM
Měřicí ústředna ALMEMO	5690-2M	-	000000317 335-0000	AHLBORN
C-BOX Analog	-	-	15110054	-
8x Termočlánek	K	Teplotní rozsah -200 až 1250 °C přesnost 0,75% [10]	-	-

## 6.2 Změřené závislosti

### 6.2.1 Jistič Siemens

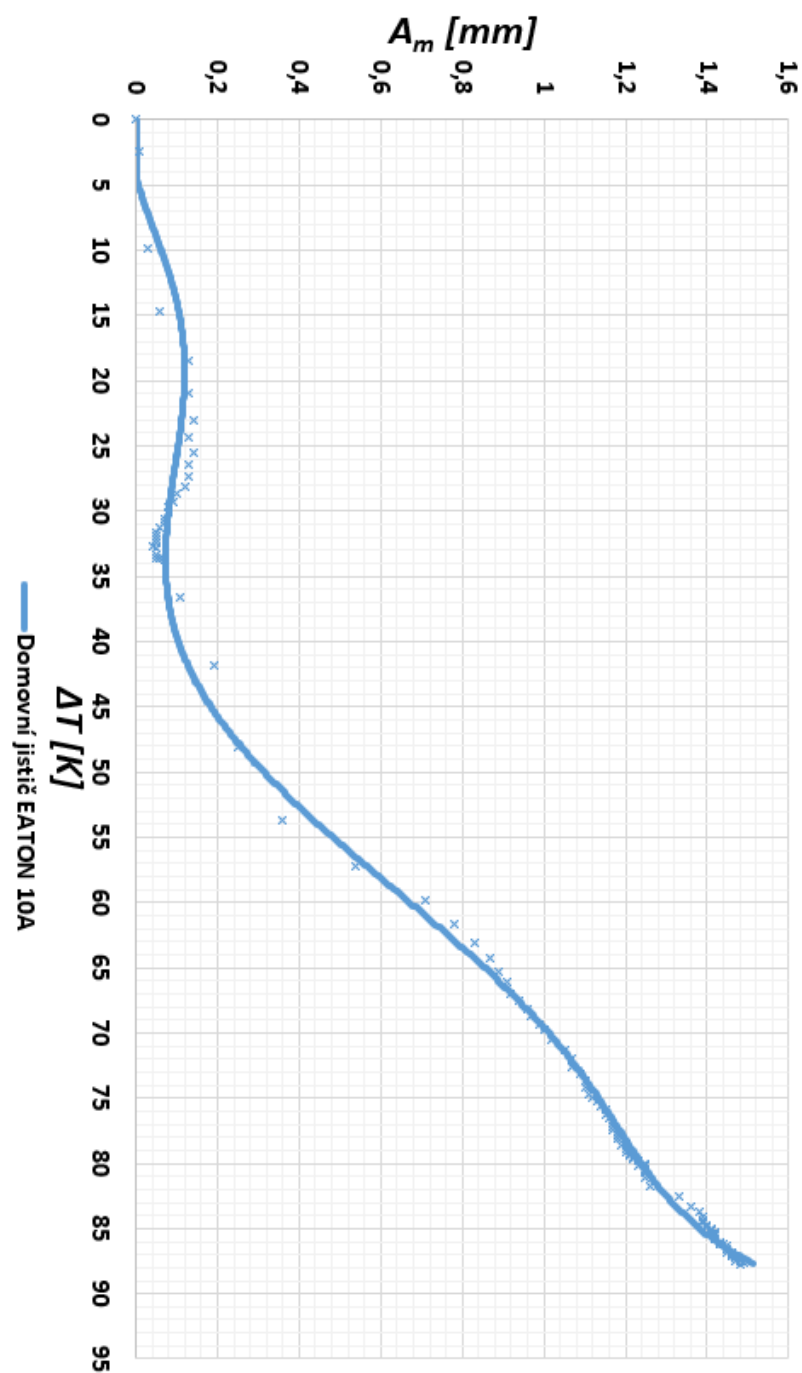


Obr. 6.5: Graf závislosti volného průhybu bimetalu kompaktního jističe Siemens 160A na průměrném oteplení

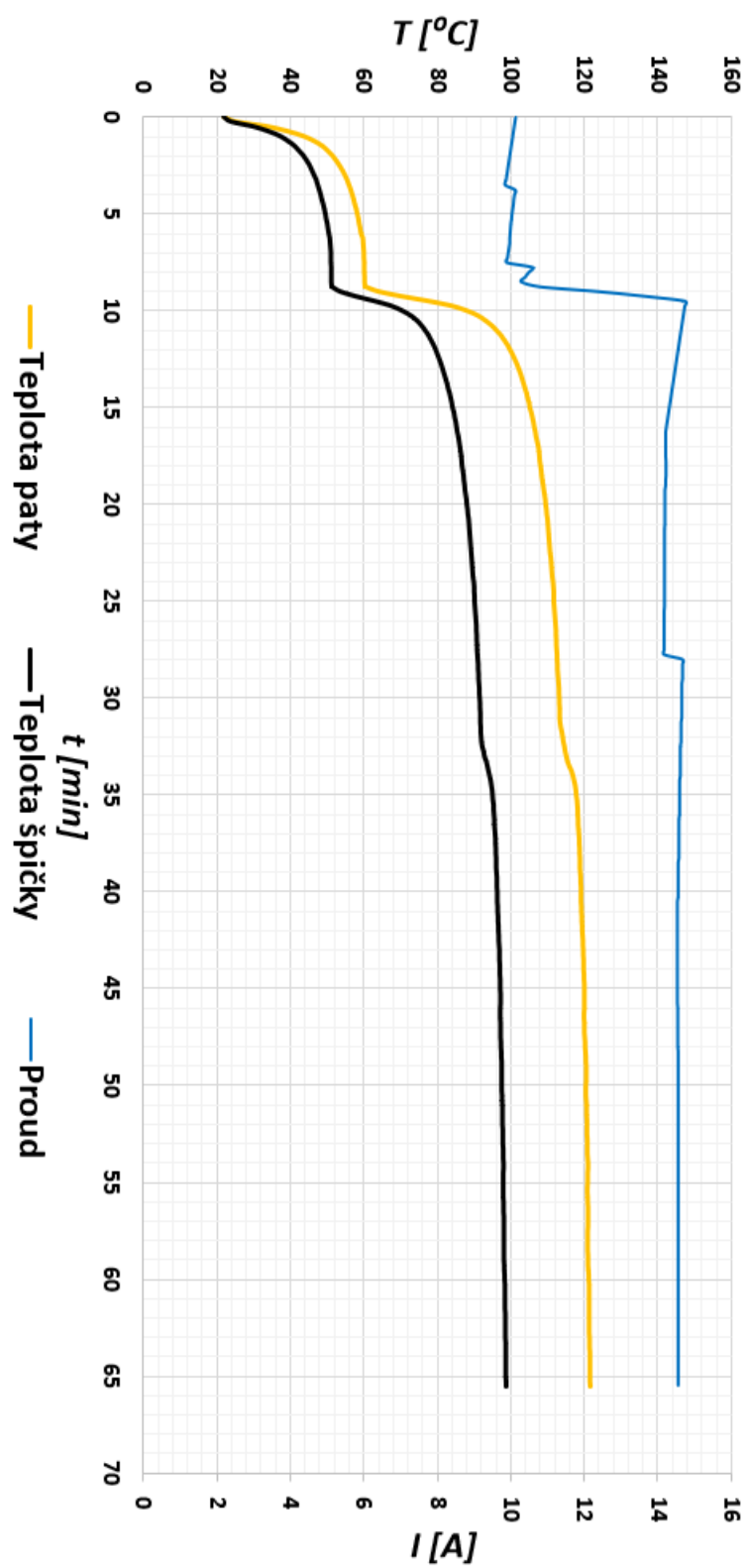


Obr. 6.6: Graf závislosti teploty částí bimetalu kompaktního jističe Siemens 160A a proudu na čase

### 6.2.2 Jistič EATON FAZ-C10/1

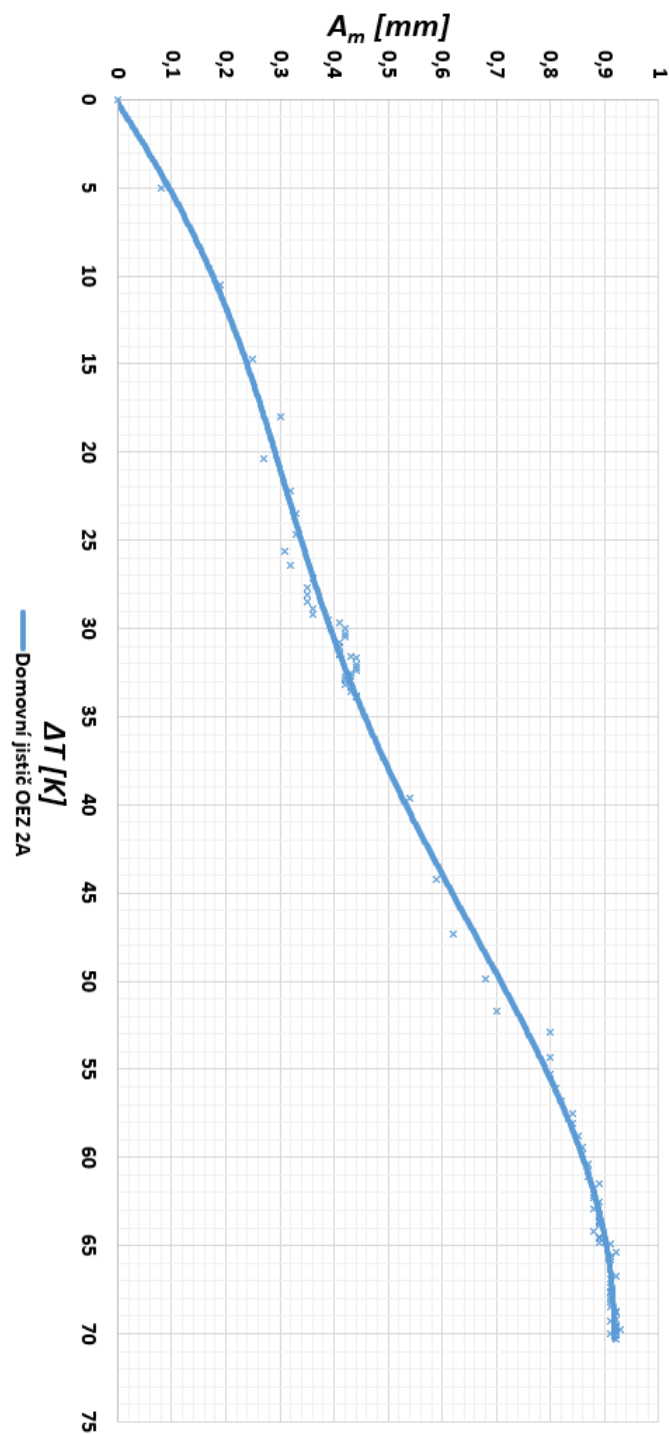


Obr. 6.7: Graf závislosti volného průhybu bimetalu domovního jističe EATON 10A na průměrném oteplení



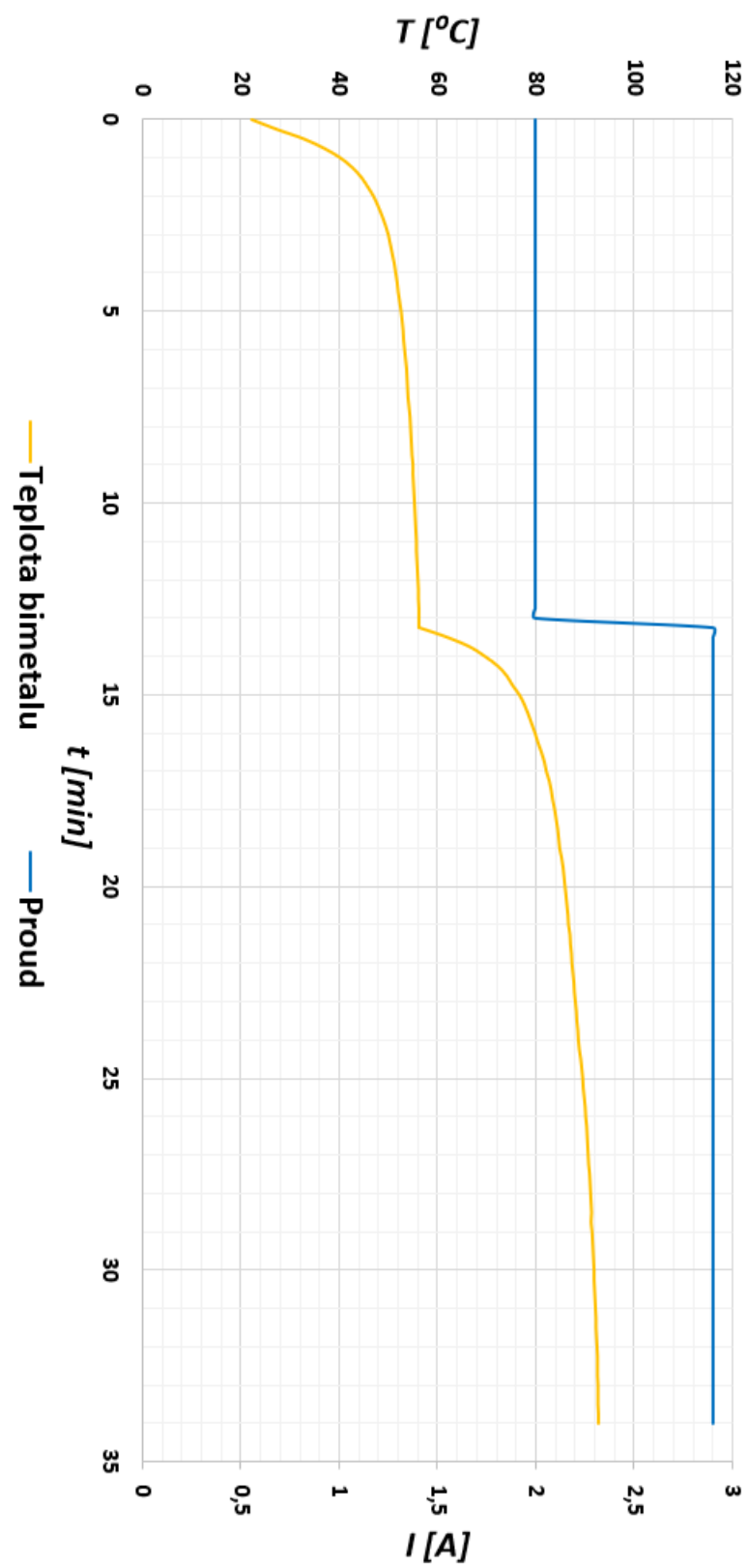
Obr. 6.8: Graf závislosti teploty částí bimetalu domovního jističe EATON 10A a proudu na čase

### 6.2.3 Jistič OEZ LSN-2B-1



Obr. 6.9: Graf závislosti volného průhybu bimetalu domovního jističe OEZ 2A na průměrném oteplení





Obr. 6.10: Graf závislosti teploty bimetalu domovního jističe OEZ 2A a proudu na čase

## 6.3 Chyby měření

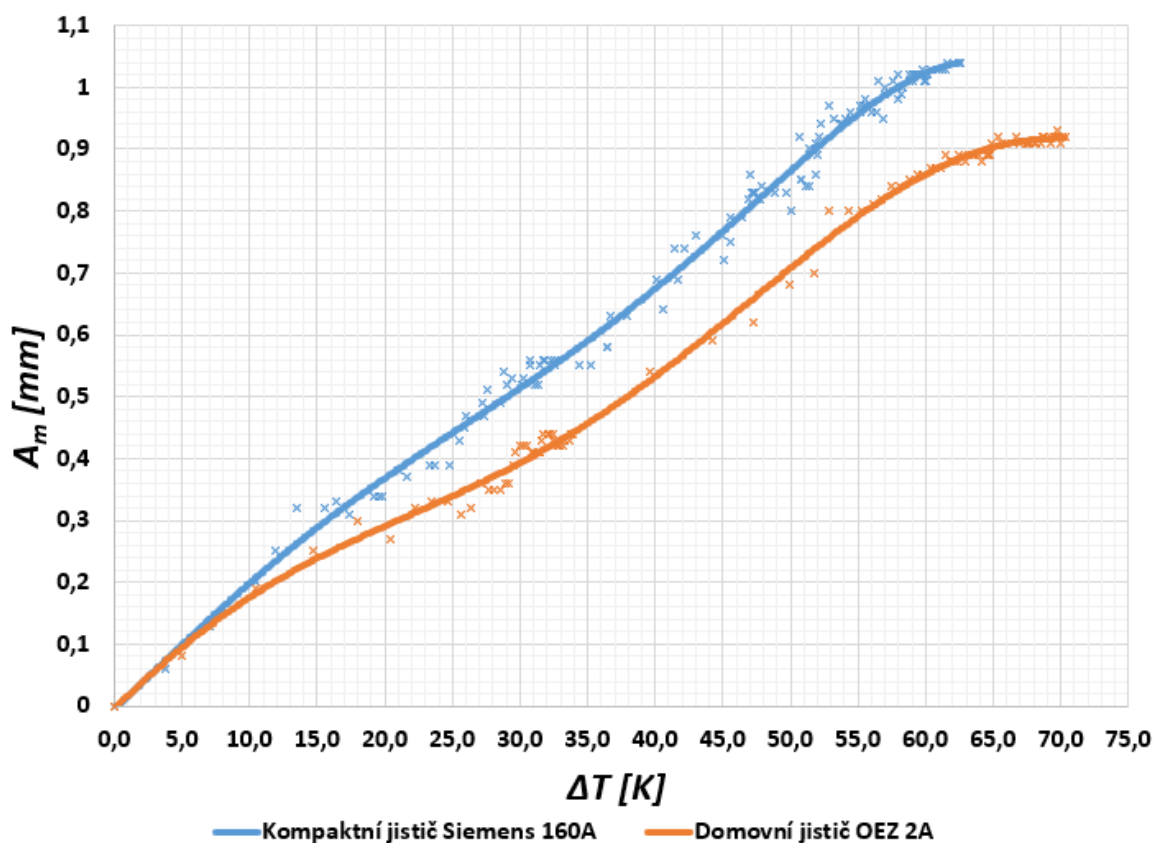
Měření bylo ovlivněno několika chybami:

- Citlivost regulace proudu ze zdroje.
- Chyby měření jednotlivých přístrojů.
- Kvůli narůstajícímu oteplení proudovodné dráhy (zvýšení odporu) lehce klesala hodnota průchozího proudu a bylo tedy nutné v určitých momentech proud přenastavit na požadovanou hodnotu.
- Při vyhodnocení měření je použit aritmetický průměr změřených teplot částí bimetalu (špička, střed, pata), ve skutečnosti je teplota bimetalu rozložena nerovnoměrně.

## 7 Porovnání měřených bimetalů

Z naměřených hodnot (příloha A, B a C) byly sestrojeny grafické závislosti volného průhybu bimetalu na průměrném oteplení a grafické závislosti teploty bimetalu a proudu na čase pro každý měřený bimetal (viz. kapitola 6.2).

Z grafů závislosti volného průhybu bimetalu na oteplení lze zjistit, že s rostoucím oteplením roste úměrně i průhyb bimetalu. Podle teoretického předpokladu by měla být závislost průhybu bimetalu na oteplení lineární, což u jističe Siemens a OEZ lze považovat za platný předpoklad. Z těchto grafů lze také vidět, že každý měřený bimetal měl různý průhyb při určitém oteplení. Lze tedy odvodit, že jsou vyrobeny z různých materiálů a mají tedy rozdílnou hodnotu měrného tepelného ohybu. Společný graf závislosti volného průhybu na oteplení je zobrazen v Obr. 7.1.



Obr. 7.1: Porovnání závislostí volného průhybu bimetalu kompaktního jističe Siemens 160A a domovního jističe OEZ 2A na oteplení

Z grafů závislosti teploty bimetalu a proudu na čase lze vidět, že každý bimetal dosahoval ustáleného průběhu oteplení v různém čase a taky při různých hodnotách teploty bimetalu. Je to ovlivněné tím, že každý z měřených bimetalů je vyroben z jiného materiálu a mají tedy i rozdílné parametry, které ovlivňují ohřev bimetalu.

Další faktor, který je nutné vzít v potaz, je procházející proud. Při měření procházel jističem jeho jmenovitý proud či násobek jmenovitého proudu, a jelikož má každý z jističů jinou hodnotu jmenovitého proudu, tak se jednotlivé bimetalové pásky zahřívaly různou rychlostí.

Při porovnání měřených hodnot s katalogovými hodnotami bylo nejprve nutné vypočítat teoretické hodnoty volného průhybu ze skutečných rozměrů bimetalového pásku umístěného v jističi. Bylo vybráno několik různých typů bimetalů a pomocí jejich měrného tepelného ohybu byl vypočítán volný průhyb pro dané oteplení. Při výpočtu volného průhybu bimetalu byla použita rovnice (5.1), skutečná délka  $L = 30 \text{ mm}$  a šířka  $s = 1 \text{ mm}$  bimetalového pásku v domovním jističi OEZ. Volný průhyb bimetalu při oteplení  $\Delta T = 20 \text{ K}$  pro bimetal typu Kanthal 155, kde  $a = 15,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , je:

$$A_v = \frac{a \times (T_1 - T_0) \times L^2}{s} = \frac{15,6 \times 10^{-6} \times 20 \times 30^2}{1} = 0,281 \text{ mm} \quad (7.1)$$

Vypočítané hodnoty volného průhybu bimetalu jsou zaznamenány v Tab. 7.1.

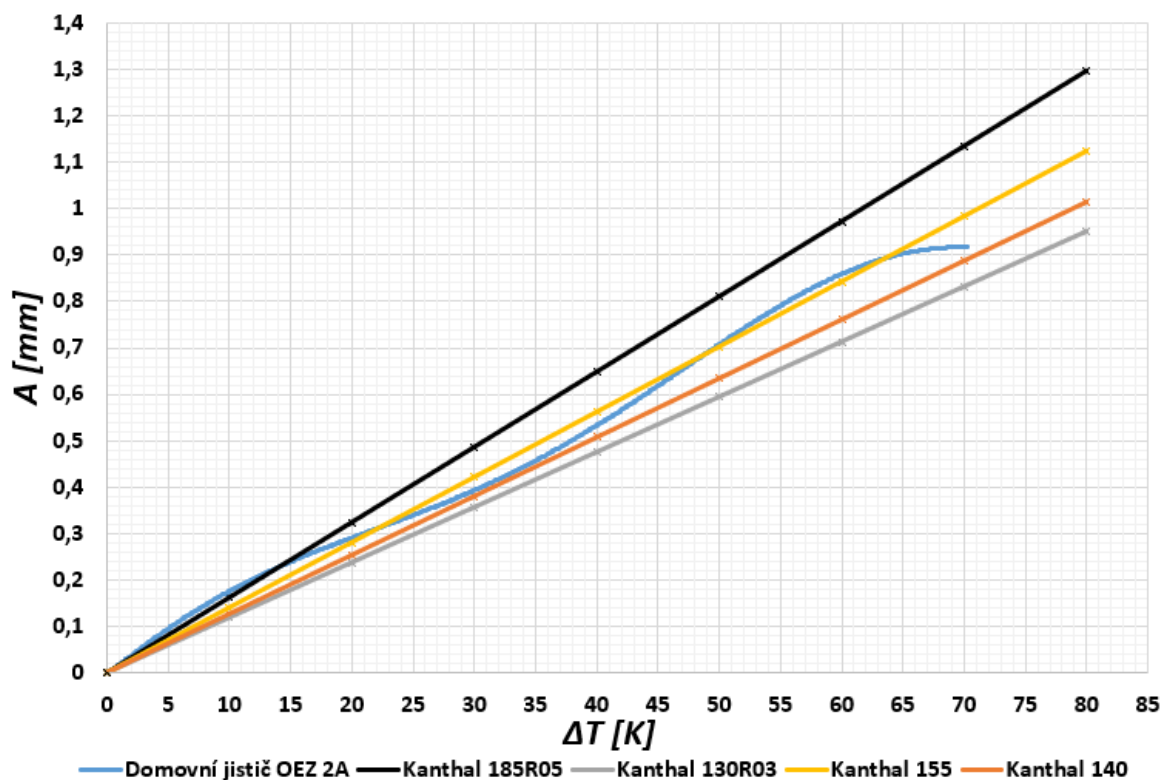
Tab. 7.1: Výpočet volného průhybu bimetalu pro rozměry bimetalu v domovním jističi OEZ 2A (hodnoty převzaty z [1])

Kanthal 140		Kanthal 155		Kanthal 130R03		Kanthal 185R05	
$a=14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$		$a=14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$		$a=13,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$		$a=18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	
$\Delta T \text{ [K]}$	$A_v \text{ [mm]}$	$\Delta T \text{ [K]}$	$A_v \text{ [mm]}$	$\Delta T \text{ [K]}$	$A_v \text{ [mm]}$	$\Delta T \text{ [K]}$	$A_v \text{ [mm]}$
0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,127	10	0,140	10	0,119	10	0,162
20	0,254	20	0,281	20	0,238	20	0,324
30	0,381	30	0,421	30	0,356	30	0,486
40	0,508	40	0,562	40	0,475	40	0,648
50	0,635	50	0,702	50	0,594	50	0,810
60	0,761	60	0,842	60	0,713	60	0,972
70	0,888	70	0,983	70	0,832	70	1,134
80	1,015	80	1,123	80	0,950	80	1,296
90	1,142	90	1,264	90	1,069	90	1,458

Z vypočítaných a naměřených hodnot byla vytvořena grafická závislost volného průhybu bimetalu na oteplení pro teoretické a naměřené hodnoty (viz. Obr. 7.2).

Z Obr. 7.2 lze vyvodit, že závislost volného průhybu bimetalu v domovním jističi OEZ 2A je podobná závislosti volného průhybu bimetalu typu Kanthal 155, je tedy možné, že bimetal v domovním jističi OEZ 2A je tvořen buď bimetalem typu Kanthal

155 nebo bimetalem typu Kanthal 155 s vícero vrstvami. Pro lepší porovnání měřeného bimetalu v domovním jističi OEZ 2A s katalogovými bimetaly byl vypočítán měrný tepelný ohyb z naměřených hodnot podle rovnice (1.12). Výsledná hodnota měrného tepelného ohybu bimetalu v domovním jističi OEZ je spolu s katalogovými hodnotami zaznamenána v Tab. 7.2.



Obr. 7.2: Graf závislosti vypočítaného a změřeného volného průhybu bimetalu na oteplení pro skutečné rozměry bimetalu v domovním jističi OEZ 2A

Tab. 7.2: Porovnání měrných tepelných ohybů bimetalů z katalogu a bimetalu v domovním jističi OEZ 2A (hodnoty převzaty z [1])

Typ bimetalu	Měrný tepelný ohyb [K <sup>-1</sup> ]	Typ bimetalu	Měrný tepelný ohyb [K <sup>-1</sup> ]
Měřený bimetal	$15,24 \times 10^{-6}$	Kanthal 200R10	$20 \times 10^{-6}$
Kanthal 200	$20,8 \times 10^{-6}$	Kanthal 180R05	$18 \times 10^{-6}$
Kanthal 155	$15,6 \times 10^{-6}$	Kanthal 155R55	$15 \times 10^{-6}$
Kanthal 145	$14,8 \times 10^{-6}$	Kanthal 145R10	$15 \times 10^{-6}$
Kanthal 135	$13,9 \times 10^{-6}$	Kanthal 135R05	$14,2 \times 10^{-6}$
Kanthal 115	$11,7 \times 10^{-6}$	Kanthal 115R09	$11,5 \times 10^{-6}$

Vypočítaná hodnota měrného tepelného ohybu bimetalu v domovním jističi OEZ 2A se nejvíce blíží k hodnotě měrného tepelného ohybu bimetalu typu Kanthal 155R55 a bimetalu typu Kanthal 145R10 (zvýrazněno modře v Tab. 7.2).

Pro porovnání bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A byly také vypočítány teoretické hodnoty volného průhybu ze skutečných rozměrů bimetalového pásku použitým v kompaktním jističi Siemens 160A, jehož délka je  $L = 44 \text{ mm}$  a tloušťka  $s = 1,2 \text{ mm}$ . Bylo vybráno několik různých druhů bimetalů a pomocí jejich měrného tepelného ohybu byl vypočítán volný průhyb pro konkrétní oteplení. Jelikož je bimetal v kompaktním jističi Siemens 160A zkoseného tvaru, byla pro výpočet volného průhybu bimetalu použita rovnice (5.13). Volný průhyb bimetalu při oteplení  $\Delta T = 40 \text{ K}$  pro bimetal typu Kanthal 115R09, kde  $a = 11,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , je:

$$A_v = \frac{a \times (T_1 - T_0) \times L^2}{s} = \frac{11,5 \times 10^{-6} \times 40 \times 44^2}{1,2} = 0,742 \text{ mm} \quad (7.2)$$

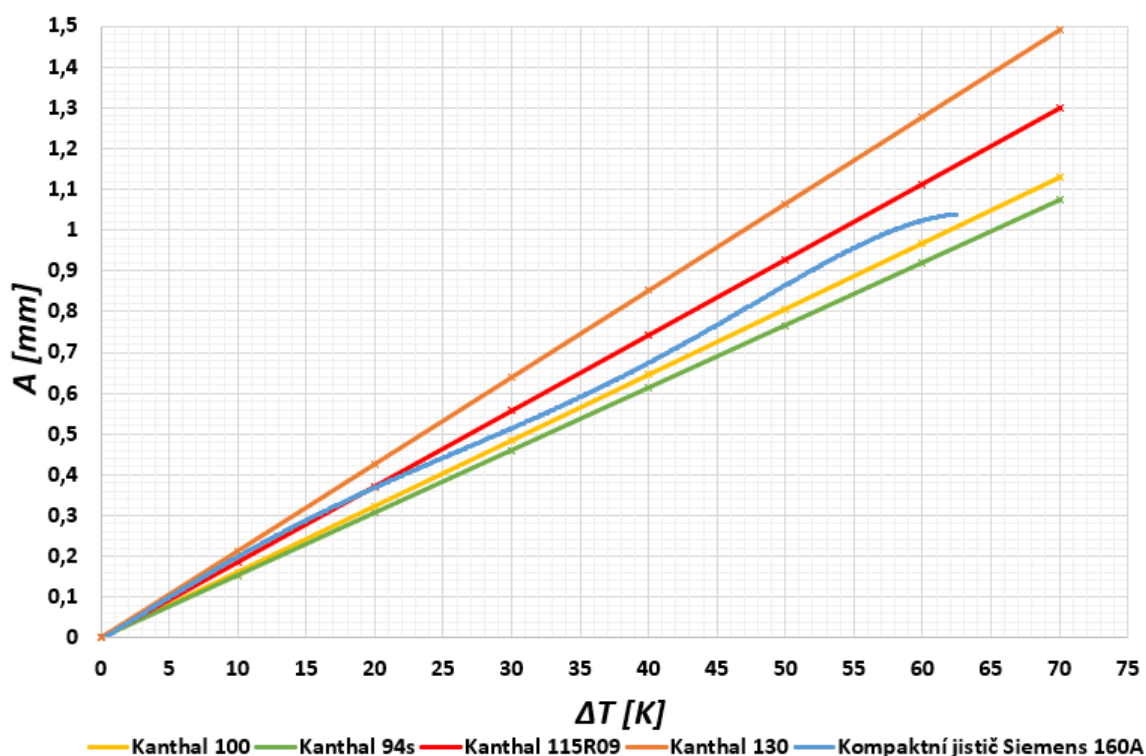
Vypočítané hodnoty volného průhybu bimetalu jsou zaznamenány v Tab 7.3.

Tab. 7.3: Výpočet volného průhybu bimetalu pro rozměry bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A (hodnoty převzaty z [1])

Kanthal 94s		Kanthal 100		Kanthal 130		Kanthal 115R09	
$a=9,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$		$a=10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$		$a=13,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$		$a=11,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	
$\Delta T \text{ [K]}$	$A_v \text{ [mm]}$	$\Delta T \text{ [K]}$	$A_v \text{ [mm]}$	$\Delta T \text{ [K]}$	$A_v \text{ [mm]}$	$\Delta T \text{ [K]}$	$A_v \text{ [mm]}$
0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,153	10	0,161	10	0,213	10	0,186
20	0,307	20	0,323	20	0,426	20	0,371
30	0,460	30	0,484	30	0,639	30	0,557
40	0,613	40	0,645	40	0,852	40	0,742
50	0,766	50	0,807	50	1,065	50	0,928
60	0,920	60	0,968	60	1,278	60	1,113
70	1,073	70	1,129	70	1,491	70	1,299

Z vypočítaných a naměřených hodnot byla vytvořena grafická závislost volného průhybu bimetalu na oteplení pro teoretické a naměřené hodnoty (viz. Obr. 7.3).

Z Obr. 7.3 lze vidět, že závislost volného průhybu bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A se pohybuje mezi křivkami volného průhybu bimetalů typu Kanthal 100 a Kanthal 115R09. Pro lepší porovnání měřeného bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A s katalogovými bimetalu byl vypočítán měrný tepelný ohyb z naměřených hodnot podle rovnice (1.12). Výsledná hodnota měrného tepelného ohybu bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A je spolu s katalogovými hodnotami zaznamenána v tabulce 7.4.



Obr. 7.3: Graf závislosti vypočítaného a změřeného volného průhybu bimetalu na oteplení pro skutečné rozměry bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A

Tab. 7.4: Porovnání měrných tepelných ohybů bimetalů z katalogu a bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A (hodnoty převzaty z [1])

Typ bimetalu	Měrný tepelný ohyb [K <sup>-1</sup> ]	Typ bimetalu	Měrný tepelný ohyb [K <sup>-1</sup> ]
Měřený bimetal	$10,76 \times 10^{-6}$	Kanthal 145R10	$15 \times 10^{-6}$
Kanthal 130	$13,2 \times 10^{-6}$	Kanthal 135R05	$14,2 \times 10^{-6}$
Kanthal 115	$11,7 \times 10^{-6}$	Kanthal 127R09	$13,4 \times 10^{-6}$
Kanthal 100	$10 \times 10^{-6}$	Kanthal 115R09	$11,5 \times 10^{-6}$
Kanthal 94s	$9,5 \times 10^{-6}$	Kanthal 60	$6 \times 10^{-6}$

Vypočítaná hodnota měrného tepelného ohybu bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A se nejvíce blíží k hodnotě měrného tepelného ohybu bimetalu typu Kanthal 115R09 (zvýrazněno modře v Tab. 7.4).

Porovnání bimetalu v domovním jističi EATON 10A s katalogovými bimetalu nebylo nutné, jelikož jeho závislost volného průhybu bimetalu na oteplení neodpovídá platným předpokladům. Bimetal v domovním jističi EATON 10A se při zahřívání začal ohýbat, ale při dalším růstu oteplení se začal bimetal ohýbat zpět k původní

poloze. Po zvýšení proudu na  $1,45I_n = 14,5$  A znovu začalo růst oteplení a bimetal se ohýbal ve správném směru. Jelikož se při zahřívání bimetal prohýbal zpět, lze tedy říci, že bimetal v domovním jističi EATON 10A je vadný a je tedy zbytečné tento konkrétní bimetal porovnávat s katalogovými hodnotami.



## Závěr

Tato bakalářská práce se věnovala bimetalům, které zastávají funkci tepelné spouště v jističích. V této práci byl popsán princip funkce bimetalu, možnosti materiálového složení a také důležité parametry bimetalu. Dále byly porovnány některé druhy bimetalů, popsáno obecné použití bimetalů s normativními požadavky u přístrojů, kde se bimetal používá, a také jsou uvedeny základní výpočty pro návrh bimetalu.

Praktická část se zabývá měřením volného průhybu bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A, domovním jističi EATON 10A a v domovním jističi OEZ 2A a následným porovnáním měřených bimetalů ze získaných výsledků. Měření u kompaktního jističe Siemens 160A probíhalo při jmenovitém proudu a také při 1,30 násobku jmenovitého proudu dle požadavků normy pro průmyslové jističe. Měření u domovních jističů EATON 10A a OEZ 2A probíhalo při jmenovitém proudu a také při 1,45 násobku jmenovitého proudu dle požadavků normy pro domovní jističe. Získaná data byla zpracována do grafické závislosti volného průhybu bimetalu na oteplení a závislosti teploty bimetalu a proudu na čase pro každý měřený bimetal v jističi (grafy jsou zobrazeny v kapitole 6.2).

Pro porovnání měřených výsledků bimetalu kompaktního jističe Siemens 160A a bimetalu domovního jističe OEZ 2A byly vypočítány teoretické hodnoty průhybu bimetalu při skutečných rozměrech měřených bimetalů při určitém oteplení pro některé katalogové bimetalu (Viz. Tab. 7.1 a Tab. 7.3). Takto získané výsledky byly spolu s měřenými hodnotami zpracovány do grafických závislostí vypočítaného a změřeného volného průhybu bimetalu na oteplení pro kompaktní jistič Siemens 160A a domovní jistič OEZ 2A (Viz. grafy v Obr. 7.2 a Obr. 7.3). Také byla vypočítána hodnota měrného tepelného ohybu pro měřený bimetal v kompaktním jističi Siemens 160A a pro měřený bimetal v domovním jističi OEZ 2A. Vypočítaná hodnota měrného tepelného ohybu bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A se nejvíce blížila hodnotě měrného tepelného ohybu bimetalu typu Kanthal 115R09 a vypočítaná hodnota měrného tepelného ohybu bimetalu v domovním jističi OEZ 2A se nejvíce blížila hodnotě měrného tepelného ohybu bimetalu typu Kanthal 155R55 a také bimetalu typu Kanthal 145R10.

Získané výsledky z měření bimetalu v domovním jističi EATON 10A se neporovnávaly s teoretickými hodnotami, jelikož se bimetal při zahřívání nejdříve ohýbal, ale při dalším růstu bimetalu se ohýbal zpět k původní poloze (Viz. graf v Obr. 6.7). Tudíž je bimetal v domovním jističi EATON 10A považován za vadný a je zbytečné tento bimetal srovnávat.

# Literatura

- [1] *Kanthal Thermostatic Bimetal Handbook* [online]. Hallstahammar, Sweden: Kanthal AB, 2008 [cit. 2020-12-20] Dostupné z: <[https://www.ibt.co.il/uploaded\\_files/documents/Kanthal\\_Thermostatic\\_Bimetal\\_U3743.pdf](https://www.ibt.co.il/uploaded_files/documents/Kanthal_Thermostatic_Bimetal_U3743.pdf)>.
- [2] *Thermostatic Bimetals* [online]. Auerhammer Metallwerk GmbH (Wickeder group), Germany: Auerhammer Metallwerk, 2020 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z URL: <[https://www.auerhammer.com/fileadmin/Data/Divisions/AMW/Download/englisch/Broschüren/Thermobimetalle\\_englisch.pdf](https://www.auerhammer.com/fileadmin/Data/Divisions/AMW/Download/englisch/Broschüren/Thermobimetalle_englisch.pdf)>
- [3] *SHIVALIK THERMOSTATIC BIMETAL Handbook* [online]. New Delhi, India: Shivalik Bimetal Control, 2020 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <<http://www.shivalikbimetals.com/Catalogue.pdf>>
- [4] *THERMOSTATICK BIMETAL* [online]. Attleboro, USA: Engineered Materials Solution (Wickeder group), 2020 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: <[https://www.wickeder-group.de/fileadmin/Data/Bimetals\\_EMS.pdf](https://www.wickeder-group.de/fileadmin/Data/Bimetals_EMS.pdf)>
- [5] ČSN EN 60898-1. *Elektrická příslušenství - Jističe pro nadproudové jištění domovních a podobných instalací - Část 1: Jističe pro střídavý provoz (AC)*. Česká republika: Český normalizační institut, 2003.
- [6] ČSN EN 60947-2. *Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 2: Jističe*. Ed. 4. Česká republika: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [7] VALENTA, J. *Popudové články spínacích přístrojů založené na bimetalech*. Brno: FEKT, 2016.[cit. 2021-05-20].
- [8] Stejnosměrné napětí - měřicí modul AHLBRON ALMEMO ZA9900AB3. *AHLBORN Přesná německá měřicí technika*[online]. [cit.2021-05-24]. Dostupné z: <<https://www.ahlborn.cz/cidla-a-snimace/elektricke-veliciny/stejnosmerne-napeti-merici-modul-ahlborn-almemo-za9900ab3.html>>
- [9] Střídavé napětí - modul AHLBRON ALMEMO ZA9903AB3. *AHLBORN Přesná německá měřicí technika*[online]. [cit.2021-05-24]. Dostupné z: <<https://www.ahlborn.cz/stridave-napeti-modul-ahlborn-almemo-za9903ab3.html>>

- [10] Termočlánky - snímače pro měření teploty: Rozsahy termočlánků a přesnosti.© 1995 - 2021. *Omegaeng.cz: Váš zdroj informací o měření a regulaci* [online]. JAKAR Electronics [cit. 2021-05-24]. Dostupné z: <<https://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>>
- [11] *Bimetals*. Electrical4U [online], 2020 [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <<https://www.electrical4u.com/bimetals/>>.
- [12] Digitální multimetr Hexagon - Amprobe 340A. *AMT měřicí technika*[online]. 2011.[cit.2021-05-24]. Dostupné z: <<https://www.amt.cz/index.php?id=HEX340>>
- [13] Proudová sonda - IT 200-S ULTRASTAB. *LEM*[online]. 2014.[cit.2021-05-24]. Dostupné z: <[https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/it\\_200-s\\_ultrastab.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/it_200-s_ultrastab.pdf)>
- [14] Proudová sonda - IT 700-S ULTRASTAB. *LEM*[online]. 2014.[cit.2021-05-24]. Dostupné z: <[https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/it\\_700-s\\_ultrastab.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/it_700-s_ultrastab.pdf)>

# Seznam příloh

A	Naměřené hodnoty volného průhybu bimetalu kompaktního jističe Siemens 160A	60
B	Naměřené hodnoty volného průhybu bimetalu domovního jističe EATON 10A	61
C	Naměřené hodnoty volného průhybu bimetalu domovního jističe OEZ 2A	62

## **A Naměřené hodnoty volného průhybu bimetalu kompaktního jističe Siemens 160A**

Tabulky naměřených hodnot z měření volného průhybu bimetalu v kompaktním jističi Siemens 160A jsou uloženy v Excelu v elektronické podobě.

## **B Naměřené hodnoty volného průhybu bimetalu domovního jističe EATON 10A**

Tabulky naměřených hodnot z měření volného průhybu bimetalu v domovním jističi EATON 10A jsou uloženy v Excelu v elektronické podobě.

## **C Naměřené hodnoty volného průhybu bimetalu domovního jističe OEZ 2A**

Tabulky naměřených hodnot z měření volného průhybu bimetalu v domovním jističi OEZ 2A jsou uloženy v Excelu v elektronické podobě.